

МРНТИ 29.15.19., 29.15.35., 29.15.53

<https://doi.org/10.26577/RCPH.2024.v91.i4.a2>А.Е. Бактораз^{1*}, Е.С. Мухамеджанов^{1,2}, Д.Е. Мықтыбеков^{1,2}, Ф.Г. Данкенова¹¹Институт ядерной физики, г. Алматы, Казахстан²Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия*e-mail: a_baktoraz@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ, ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ПОТОКА НЕЙТРОНОВ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ КАНАЛЕ КРИТИЧЕСКОГО СТЕНДА РЕАКТОРА ВВР-К

В статье рассматривается процесс моделирования и регистрации потоков нейтронов в горизонтальном канале критического стенда реактора ВВР - К. Основное внимание уделено использованию детекторов нейтронов, таких как СНМ - 18 и сцинтилляционный детектор на основе ортокарборана. В ходе работы применялись методы моделирования с использованием программного пакета GEANT4, что позволило изучить взаимодействие нейтронов с различными замедлителями, включая полиэтилен и боросодержащий полиэтилен, а также без них.

Проведенные исследования включали разработку и тестирование методик регистрации потоков нейтронов в разных режимах работы критического стенда. Использование сцинтилляторов с добавлением ортокарборана обеспечило высокую чувствительность детекторов, что позволяет регистрировать нейтронные потоки с высокой точностью. Кроме того, данные, полученные при моделировании и экспериментальной работе, были обработаны с использованием современных инструментов анализа, таких как ROOT.

Полученные результаты способствуют дальнейшему развитию технологий в области нейтронных измерений, ядерной физики и радиационной безопасности. Эти подходы могут быть использованы для совершенствования методов регистрации нейтронов, что имеет большое значение как для научных исследований, так и для промышленных применений.

Ключевые слова: нейтронные детекторы, GEANT4, замедлители нейтронов, сцинтилляционные детекторы, реактор ВВР-К.

Ә.Е. Бақтораз^{1*}, Е.С. Мұхамеджанов^{1,2}, Д.Е. Мықтыбеков^{1,2}, Ф.Г. Данкенова¹¹Ядролық физика институты, Алматы қ., Қазақстан²Біріккен ядролық зерттеулер институты, Дубна қ., Ресей*e-mail: a_baktoraz@mail.ru

ССР-Қ реакторының критикалық стендінің көлденең арнасындағы нейтрондар ағынын модельдеу, өңдеу және талдау

Мақалада ССР-Қ реакторының критикалық стендінің көлденең арнасындағы нейтрон ағындарын модельдеу және тіркеу үдерісі қарастырылады. Негізгі назар нейтрон детекторлары, соның ішінде СНМ - 18 және орто-карборан негізіндегі сцинтилляциялық детекторды қолдануға аударылған. Жұмыста GEANT4 бағдарламалық пакетін пайдалану арқылы модельдеу әдістері қолданылып, нейтрондардың полиэтилен, бор қосылған полиэтилен сияқты әртүрлі баяулатқыштармен және баяулатқышсыз өзара әрекеттесуі егжей-тегжейлі зерттелді.

Зерттеулерде критикалық стендтің әртүрлі жұмыс режимдерінде нейтрон ағындарын тіркеу әдістерін әзірлеу және сынақтан өткізу жүргізілді. Орто-карборан қоспасы бар сцинтилляторларды пайдалану детекторлардың жоғары сезімталдығын қамтамасыз етіп, нейтрон ағындарын дәл тіркеуге мүмкіндік берді. Сонымен қатар, модельдеу және тәжірибелік зерттеулерден алынған деректер ROOT (Еуропалық ядролық зерттеулер орталығында әзірленген объектіге бағытталған бағдарламалар мен кітапханалар пакеті) сияқты заманауи талдау құралдарын пайдалана отырып өңделді.

Алынған нәтижелер нейтронды өлшеу, ядролық физика және радиациялық қауіпсіздік саласындағы технологияларды одан әрі дамытуға ықпал етеді. Бұл тәсілдер нейтрондарды тіркеу әдістерін жетілдіруге қолданылып, ғылыми зерттеулер мен өндірістік қолданбалар үшін маңызды рөл атқарады.

Түйін сөздер: нейтрондық детекторлар, GEANT4, нейтрон баяулатқыштары, сцинтилляциялық детекторлар, ССР-Қ реакторы.

A.Y. Baktoraz^{1*}, Y.S. Mukhamejanov^{1,2}, D.Y. Myktybekov^{1,2}, F.G. Dankenova¹

¹Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan

²Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

*e-mail: a_baktoraz@mail.ru

Modeling, processing, and analysis of neutron flux in the horizontal channel of the critical experimental reactor facility of the WWR-K reactor

The article examines the process of modeling and registering neutron flux in the horizontal channel of the critical experimental reactor facility of the WWR-K reactor. The focus is on the use of neutron detectors, such as the SNM-18 and a scintillation detector based on ortho-carborane. The work employed modeling methods using the GEANT4 software package, enabling a detailed study of neutron interactions with various moderators, including polyethylene, boron-containing polyethylene, and configurations without moderators.

The research involved the development and testing of methodologies for registering neutron fluxes in different operating modes of the critical assembly. The use of scintillators with ortho-carborane additives provided high sensitivity, allowing for accurate neutron flux registration. Furthermore, the data obtained from modeling and experimental studies were processed using modern analysis tools such as ROOT.

The results contribute to the advancement of technologies in neutron measurements, nuclear physics, and radiation safety. These approaches can be applied to improve neutron detection methods, which are important for both scientific research and industrial applications.

Keywords: neutron detectors, GEANT4, neutron moderators, scintillation detectors, WWR-K reactor.

Введение

Атомные реакторы широко применяются в таких сферах, как ядерная энергетика, медицина (например, в радиотерапии) и исследования новых материалов, предоставляя значительные энергетические ресурсы и научные возможности. Однако при их эксплуатации образуются нейтроны, которые могут оказывать влияние на окружающую среду [1-9].

Измерение нейтронного потока играет ключевую роль в ядерной физике и энергетике. Такие измерения помогают глубже понять и контролировать процессы деления атомных ядер, а также использовать эти данные в научных и промышленных целях [10-12]. Для проведения таких измерений применяются нейтронные счетчики, такие как СНМ-18 [13-15], ортокаборановые сцинтилляционные детекторы и критический стенд. Эти инструменты позволяют лучше изучить физические процессы, происходящие при взаимодействии нейтронов с ядрами и окружающими материалами. Поскольку один счетчик не всегда может предоставить полную картину потока нейтронов, их размещают в разных точках. Это помогает собрать инфор-

мацию о потоке нейтронов с разных углов и направлений, что важно для более точного анализа их характеристик [16].

Методика и методы исследования

Geant4 представляет собой программный пакет, включающий инструменты для точного моделирования взаимодействия частиц с веществом [17-19]. Поддерживаемые физические процессы охватывают широкий спектр, включая электромагнитные, адронные и оптические взаимодействия, а также многочисленные частицы, материалы и элементы с энергиями от 250 эВ до нескольких ТэВ. Моделирование с использованием Geant4 начинается с разработки плана эксперимента и анализа основных характеристик экспериментальной части. На следующем этапе создается программа на языке C++, с применением библиотек Geant4. После компиляции программы выполняется расчет и анализ результатов. По мере необходимости вносятся изменения в программу, и процесс продолжается до получения удовлетворительных данных.

Для оценки эффективности регистрации тепловых нейтронов необходимо провести моделирование нейтронных детекторов с использованием программного пакета GEANT4. В качестве детекторов использовались СМ-18, установленный внутри полиэтиленового замедлителя в бетонном помещении исследовательского реактора ВВР-К, и газонаполненный детектор straw на основе фторида бора.

Моделирование нейтронного источника с энергетическим спектром типа PuBe(α, n) и интенсивностью $1.8 \cdot 10^6$ н/с было выполнено с применением общеимперического подхода, как представлено на рисунке 1.

Моделирование процессов взаимодействий нейтронов с веществом и характеристик счетчиков СМ-18 и газоразрядных трубок было выполнено в программном пакете GEANT4 [20, 21] (рисунок 2). Регистрация тепловых нейтронов производится за счет взаимодействия активного вещества ^{10}B и ^3He , где при взаимодействии

тепловых нейтронов проходят реакции по основным каналам:

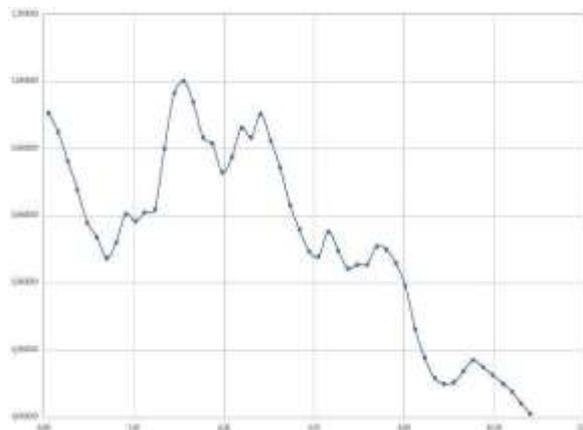
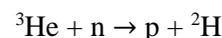
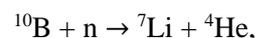


Рисунок 1 – Спектр нейтронов от плутоний-бериллиевого источника

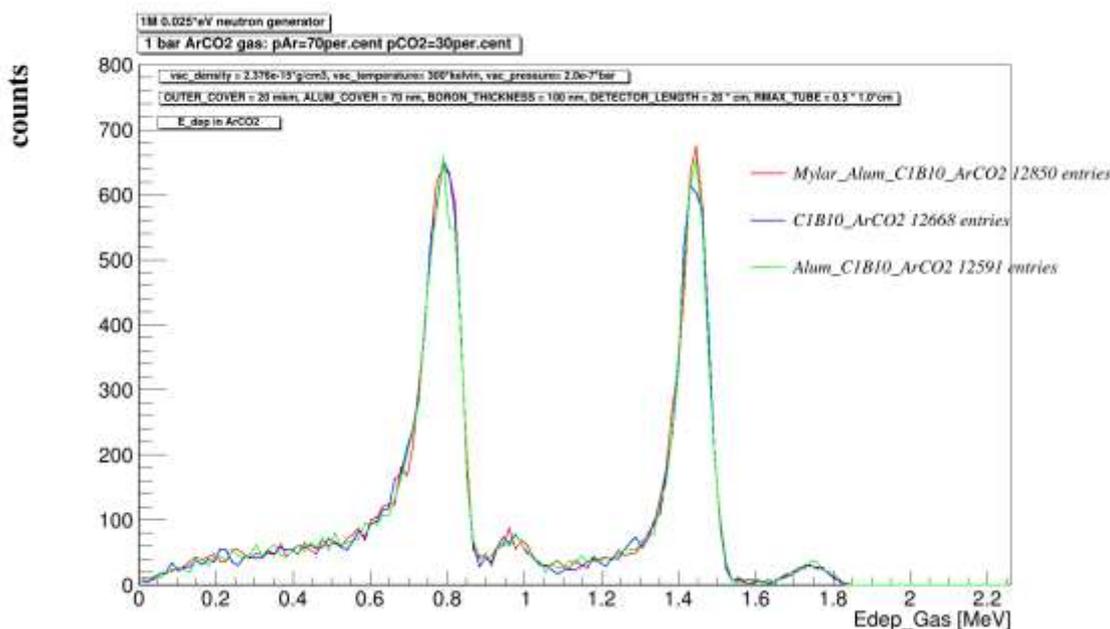


Рисунок 2 – Спектр регистрации нейтронов от плутоний-бериллиевого источника, смоделированный с помощью борсодержащего счетчика в GEANT4

Экспериментальная часть

Разработана и отработана методика регистрации потоков нейтронов в горизонтальном канале критического стенда реактора ВВР-К в Институте ядерной физики г. Алматы. В качестве счетчика используется нейтронный счетчик СМ-18 и ортокарборановый сцинтилляционный детектор [22], в котором для повышения эффективности счета нейтронов разобраны и отпаяны контактные

элементы. Применяются три методики регистрации тепловых нейтронов с использованием трех счетчиков СМ-18: один из счетчиков установлен в блоке из полиэтилена, который служит замедлителем и отражателем, второй помещен в блок из борполиэтилена, выполняющего функцию замедлителя, третий используется без какого-либо блока замедлителя или отражателя. Счетчики размещены в нескольких ключевых локациях. Размещение счетчиков над КС позволяет измерять

интенсивность нейтронного потока, выходящего из активной зоны КС в верхнем направлении. Это важно для понимания процессов ядерного деления и взаимодействия, происходящих в активной зоне, и их влияния на выходящие нейтроны. Расположение счетчиков под КС направлено на измерение нейтронов, прошедших через нижний слой активной зоны, что позволяет оценить, сколько нейтронов доходит до нижних уровней КС и имеет значение для оценки безопасности и эффективности работы стенда.

На рисунке 3 представлено сравнение результатов измерений, проведенных с использованием трех различных замедлителей. Как видно из рисунка, счетчик, размещенный в полиэтилене, демонстрирует высокий счет, поскольку в нем нейтроны замедляются до тепловой энергии из активной зоны. В борополиэтилене, из-за поглощения нейтронов бором, счет значительно ниже, а скорость счета потока нейтронов без замедлителя или отражателя примерно на 1,2 раза меньше.

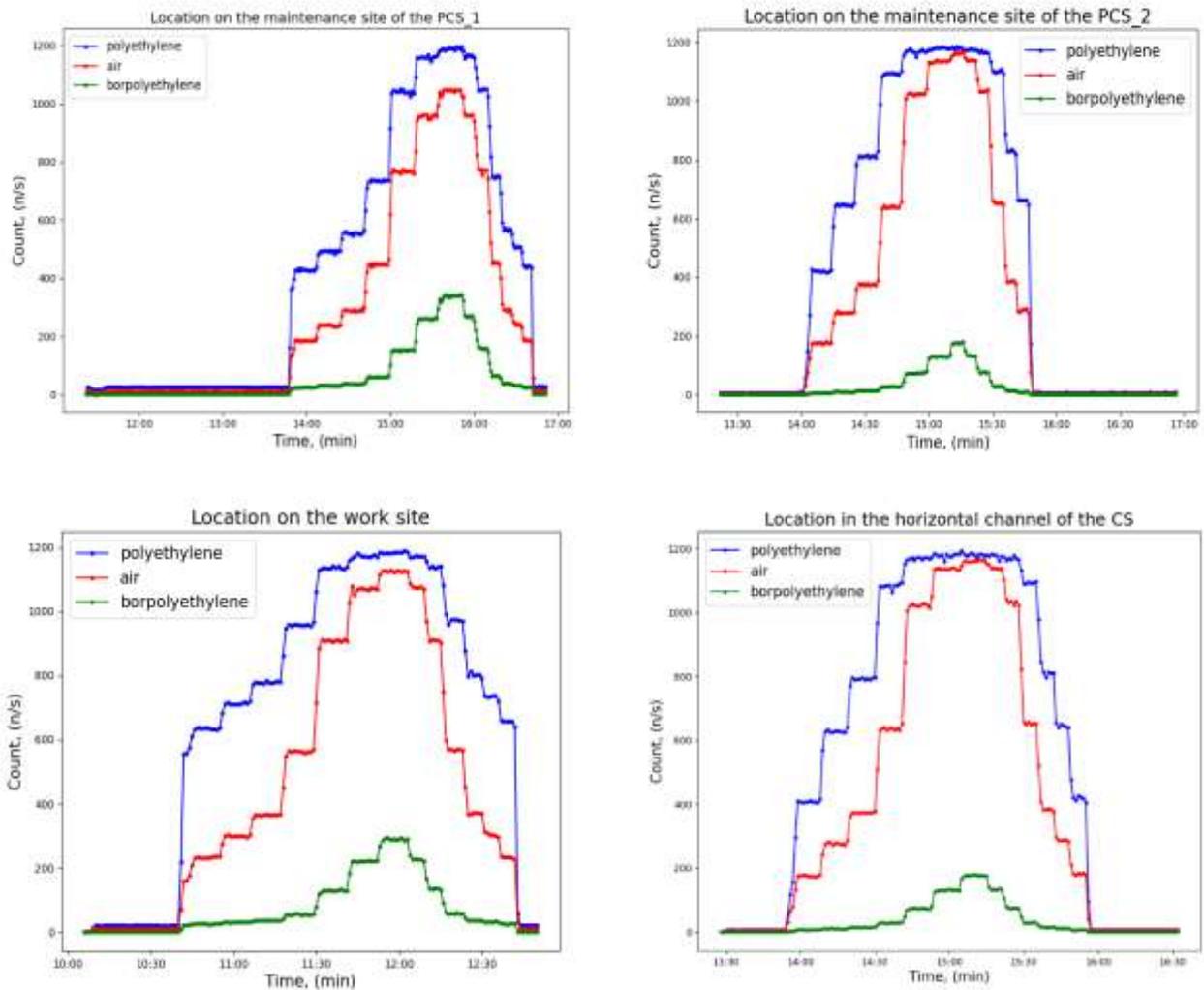


Рисунок 3 – Динамика потока нейтронов во времени (СНМ-18)

На рисунках 4, 5 и 6 показана зависимость скорости счета от мощности по данным аппаратуры контроля нейтронного потока (АКНП) для трех конфигураций счетчиков: без замедлителя (рисунок 4), с борным замедлителем (рисунок 5) и с полиэтиленовым замедлителем (рисунок 6). Данные обработаны с исполь-

зованием инструмента ROOT, и проведено фитирование по функции распределения Ландау. Эта функция имеет вид, схожий с распределением Гаусса, но с характерным "хвостом" вправо. В результате фитирования были получены значения параметров функции Ландау, такие как хи-квадрат и сигма для каждой конфигурации.

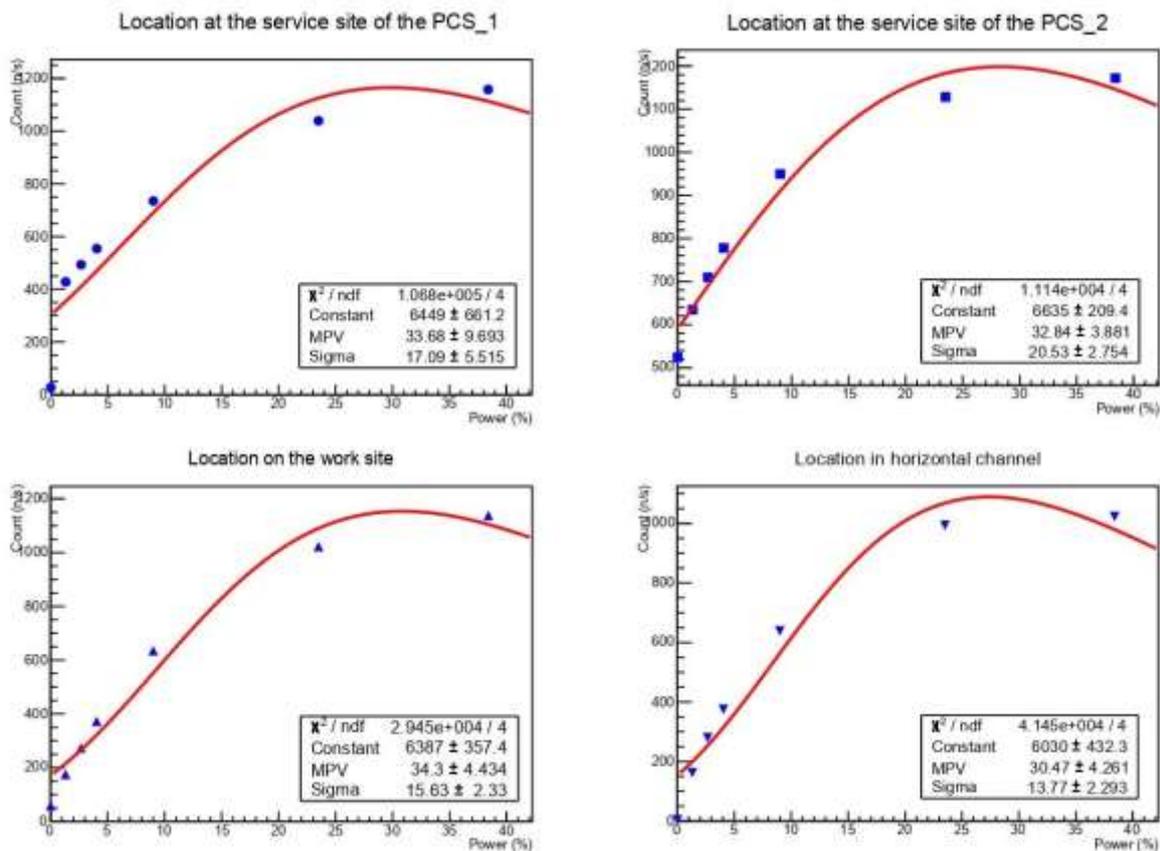


Рисунок 4 – Зависимость скорости счета от мощности по АКНП без замедлителя/отражателя

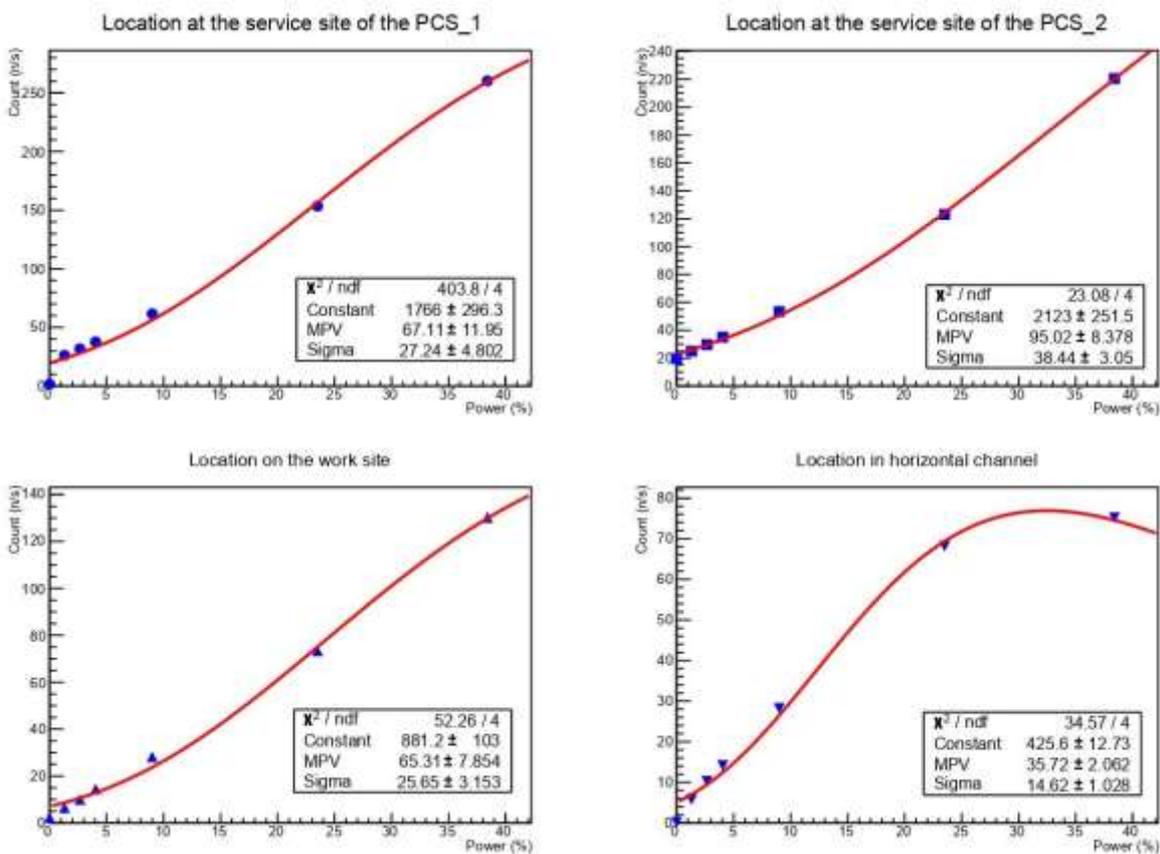


Рисунок 5 – Зависимость скорости счета от мощности по АКНП блока из борополиэтилена

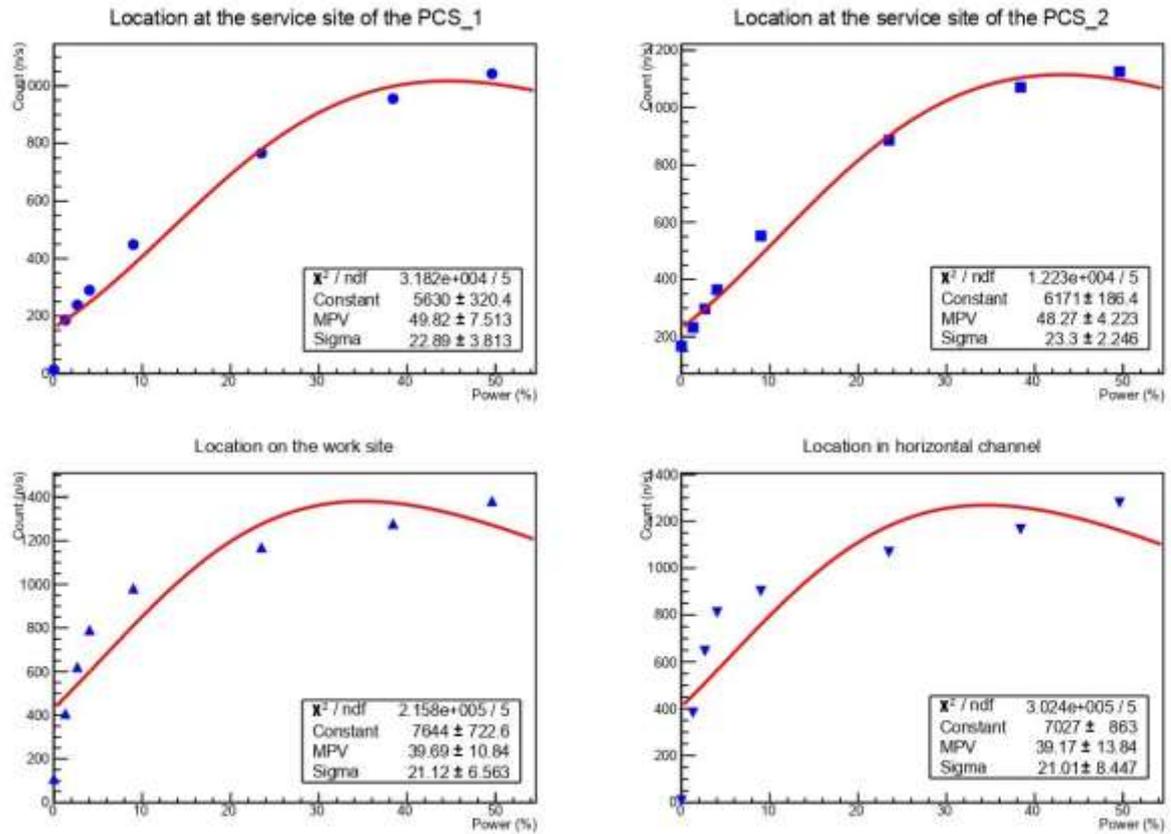


Рисунок 6 – Зависимость скорости счета от мощности по АКНП блока из полиэтилена

Быстродействующие сцинтилляционные детекторы на основе ортокарборана были установлены в различных позициях: на площадке обслуживания СУЗ, на рабочей площадке, в горизонтальном канале КС и в коридоре рядом с аварийным выходом. На рисунках показаны изменения нейтронного поля в разных точках наблюдения (рисунок 7). Сцинтиллятор с добавкой ортокарборана продемонстрировал высокую чувствительность как при высоких, так и при низких уровнях нейтронного поля. Графики полученных данных показывают, что импульсы, зарегистрированные сцинтиллятором с ортокарбораном, хорошо коррелируют с интенсивностью нейтронных потоков в зависимости от пространственного распределения детекторов.

Заключение

В заключение проведены эксперименты по регистрации и моделированию потоков нейтронов в горизонтальном канале критического стенда реактора ВВР-К с использованием нейтронных счетчиков большой площади. Интенсивности потоков нейтронов от критического стенда измерялись с помощью счетчика СНМ-18, при этом были разработаны программные приложения для обработки данных на основе Python, а также исследовалась

корреляция между значениями атмосферного давления и числом счетов. Результаты измерений продемонстрировали явный отклик счетчиков как на режим работы реактора, так и на среду-замедлитель, в которую они помещались. Численные результаты измерений на критическом стенде можно считать физически обоснованными. Фоновый счет нейтронов во всех счетчиках, включая полиэтиленовый и боросодержащий, а также без замедлителя, не превышал 1 имп/с. В то же время счет от критического стенда в запущенном режиме показывал, что счет в полиэтилене превышал счет без замедлителя примерно в 4 раза, а в боросодержащем полиэтилене — в 20 раз.

Внедрение сцинтилляторов с ортокарборановой добавкой позволило добиться высокой чувствительности как при высоких, так и при низких интенсивностях нейтронного потока. Полученные данные подтверждают, что регистрируемые импульсы сцинтиллятора хорошо коррелируют с интенсивностью нейтронных потоков и зависят от пространственного распределения детекторов.

Эти результаты открывают широкие перспективы для дальнейших исследований в области нейтронных измерений, ядерной физики и радиационной безопасности.

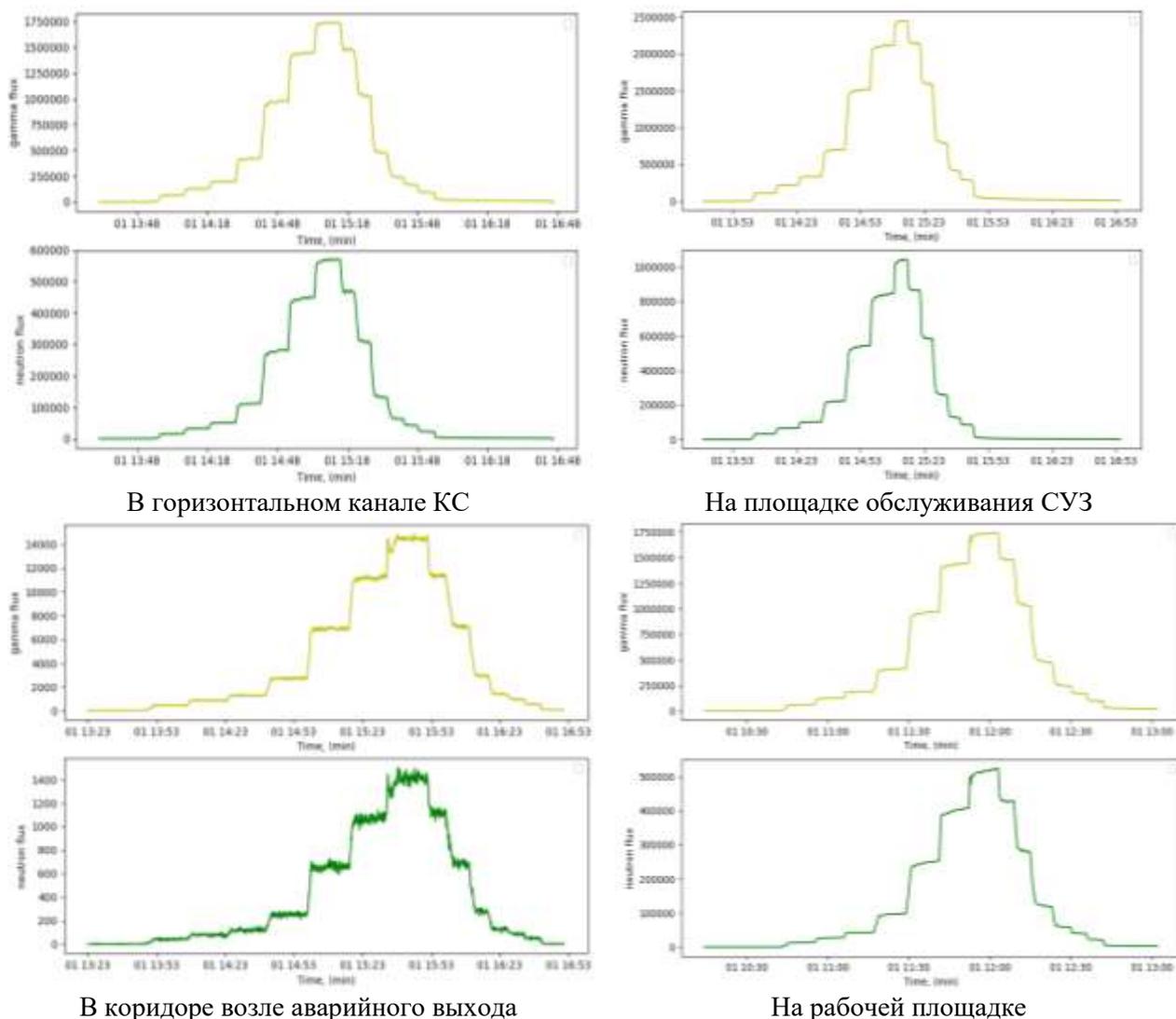


Рисунок 7 – Зависимость нейтронного поля в разных режимах работы КС

Благодарность

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант №

BR21881930 «Реакторные исследования, направленные на обеспечение безопасной и эффективной эксплуатации перспективных ядерных и термоядерных энергетических установок»).

Литература

- 1 Оскомов В.В., Седов А.Н., Садуев Н.О., Каликулов О.А., Мендибаев К.О., Жумабаев А.И., Мухамеджанов Е.С., Искаков Б.А., Байгарашев Д.М., Таутаев Е.М., Кенжина И.Е. Микроомощные узлы радиоэлектронного тракта нейтронного детектора // Известия НАН РК, Серия физико-математическая. – 2014. – 2(294). – С.69-73.
- 2 Мухамеджанов Е.С., Каликулов О.А., Шинбулатов С.К., Жумабаев А.И., Утей Ш.Б., Ережел Н.О., Седов А.Н., Сәрсенбай У.С., Бактораз А.Е., Садуев Н.О. Разработка методики и аппаратуры для измерения плотности потока нейтронов от реактора ВВР-К // Вестник КазНУ. Серия физическая. – 2020. – Т. 75, №4. – С. 96–101. DOI: 10.26577/RCPH.2020.v75.i4.10
- 3 Коломеец Е.В., Фридман Ш.Д., Абеленцев В.В., Айтбаев Ф.Б., Воробьев А.А., Ефимов В.В., Оскомов В.В., Пфедфер Р.Г-Э., Седов А.Н., Стельников Н.В. Разработка способа и автоматической системы по определению влагозапаса в снеге и влажности почв по космическим лучам. – Алматы. – 1986. – 121 с.
- 4 Филиппов М.В., Махмутов В.С., Стожков Ю.И., Максумов О.С., Raulin J.-P., Tacza J. Наземная установка для детектирования нейтральной компоненты космических лучей “Нейтронный детектор” // Приборы и техника эксперимента. – 2020. – № 5. – С. 96–103. DOI: 10.31857/S00328162220050298

- 5 Стенькин Ю.В., Алексеенко В.В., Громушкин Д.М., Сулаков В.П., Щеголев О.Б. Подземная физика и эффект влияния барометрического давления на подземный фоновый поток тепловых нейтронов // ЖЭТФ. – 2017. – Т.151, №5. – С. 845–849.
- 6 Шаймерденов А.А., Гизатулин Ш.Х., Накипов Д.А., Кенжин Е.А., Чихрай Е.В., Заурбекова Ж.А., Толенова А.У., Нестеров Е.А., Кизанэ Г. Экспериментальная база реактора ВВР-К для исследования выхода трития из материалов при их облучении // Вестник НЯЦ РК. – 2020. – Вып.1. – С.104-110. DOI: 10.52676/1729-7885-2020-1-104-111
- 7 Shaimerdenov A.A., Nakipov D.A., Arinkin F.M., Gizatulin Sh.Kh., Chakrov P.V., and Kenzhin Ye.A. The 50 Anniversary of the WWR-K Research Reactor // Physics of Atomic Nuclei. – 2018. – Vol. 81. – P.1408-1411. DOI: 10.1134/S1063778818100162
- 8 Brovchenko M. and et al. Neutron-gamma flux and dose calculations in a Pressurized Water Reactor (PWR) // EPJ Web of Conferences. – 2017. – Vol.153. – Art.No 05008. DOI: 10.1051/epjconf/201715305008
- 9 Brovchenko M., Duhamel I., Dechenaux B. Neutron-gamma flux and dose calculations for feasibility study of DISCOMS instrumentation in case of severe accident in a GEN 3 reactor // EPJ Web of Conferences. – 2017. – Vol.153. – Art.No 07030. DOI: 10.1051/epjconf/20171530
- 10 Van der Ende B.M., Li L., Godin D., Sur B. Stand-off nuclear reactor monitoring with neutron detectors for safeguards and non-proliferation applications // Nature Communications. – 2019. – Vol. 10. – Art.No 1959. DOI: [0.1038/s41467-019-09967-4](https://doi.org/10.1038/s41467-019-09967-4)
- 11 Raj P., Angelone M., Fischer U., Klixa A. Computational study of a chromium self-powered detector for neutron flux monitoring in the test blanket module of ITER // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research A. – 2018. – Vol. 908. – P.10–17.
- 12 Klixa A., Angelone M., Fischer U., Gehre D., Ghidersa B., Lyoussi A., Raj P., Reimann Th., Szalkai D., and Tian K. Neutron Measurement Instrumentation Development at KIT for the European ITER TBM // IEEE. – 2015. – Vol. 47. – P.8. DOI: 10.1109/ANIMMA.2015.7465635
- 13 Филиппов М. В., Махмутов В. С., Стожков Ю. И., Ролан Ж.-П., Калинин Е. В. Исследование вариаций потоков нейтронов с помощью наземного нейтронного детектора // Известия РАН. Серия физическая. – 2019. – Т. 83, № 5. – С. 670–672.
- 14 Мұхаметқалиұлы Ә. Методика измерения потоков тепловых нейтронов с помощью детектора СНМ-18 для прикладных задач // Международная конференция студентов и молодых учёных «ФАРАБИ ӘЛЕМІ». – Алматы, 2022. – С. 151.
- 15 Алейников В.Е., Архипов В.А., Бескровная Л.Г., Тимошенко Г.Н. Сравнительные исследования характеристик газоразрядных детекторов нейтронов при работе в полях с высокими уровнями гамма-излучения // Препринт ОИЯИ, Дубна. –1997. –№16. – P.97-158.
- 16 Шаймерденов А.А., Аринкин Ф.М., Гизатулин Ш.Х., Дюсамбаев Д.С., Колточник С.Н., Чакров П.В., Чекушина Л.В., Шаманин И.В. Пуск и нейтронно-физические характеристики критического стенда РГП «Институт ядерной физики» РК с низкообогащенной активной зоной // Альтернативная энергетика и экология. – 2015. – №23 (187). – С. 51-59.
- 17 Basaglia T., Bell Z.W., Dressendorfer P., Larkin A., and Pia M.G. Writing Software or Writing Scientific Articles? // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 2008. – Vзд. 55. – No. 2. – P. 671-678.
- 18 Allison J., and et al. Geant4 Developments and Applications // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 2006. – Vol. 53. – No. 1. – P. 270-278.
- 19 Тертышников А.В. Модель приземного нейтронного фона в Кабардино-Балкарии и на южном склоне Эльбруса в июне 2014 г. // Гелиогеофизические исследования. – 2015. – №13. – С. 42-48.
- 20 Филиппов М. В., Стожков Ю. И., Махмутов В. С., Максумов О. С., Викторов С. В., А. Н. Квашнин, Квашнин А. А. Разработка компактного наземного нейтронного детектора // Известия РАН. Серия физическая. – 2015. – Т. 79, № 5. – С. 753–756.
- 21 Шинбулатов С.К., Садуев Н.О., Каликулов О.А. и др. Разработка метода и оборудования для измерения потока нейтронов от исследовательского реактора // Recent Contributions to Physics. – 2023. –N2(85). – С.23-28.
- 22 Кузнецов С.П., Мешков И.В., Поташев С.И., Бурмистров Ю.М., Караевский С.Х. Анализ данных, измеренных с помощью детектора нейтронов на основе бора-10 и счетчика с гелием-3 на фотонейтронном источнике нейтронов ИЯИ РАН // Известия РАН. Серия физическая. – 2018. – Т. 82, № 6. – С. 808–810.

References

- 1 V.V. Oskomov, A.N. Sedov, N.O. Saduev, O.A. Kalikulov, K.O. Mendibaev, A.I. Zhumabaev, E.S. Mukhamedzhanov, B. Iskakov, D.M. Baigarashev, E.M. Tautaev, I.E. Kenzhina, Izvestiya NAN RK, Seriya Fiziko-Matematicheskaya 2(294), 69–73 (2014) (In Russ).
- 2 E.S. Mukhamedzhanov, O.A. Kalikulov, S.K. Shinbulatov, A.I. Zhumabaev, Sh.B. Utei, N.O. Yerezhep, A.N. Sedov, U.S. Sarsenbai, A.E. Bakhtoraz, N.O. Saduev, Recent Contributions to Physics, 75(4), 96–101 (2020) (In Russ). DOI: 10.26577/RCPH.2020.v75.i4.10
- 3 E.V. Kolomeets, Sh.D. Fridman, V.V. Abelentsev, F.B. Aytbaev, A.A. Vorobyev, V.V. Efimov, V.V. Oskomov, R G.-E. Pfeffer, A.N. Sedov, N.V. Stelnnikov, Development of a method and automatic system for determining moisture content in snow and soil moisture using cosmic rays Almaty, 121 p. (1986) (In Russ).

- 4 M.V. Filippov, V.S. Makhmutov, Yu.I. Stozhkov, O.S. Maksumov, J.-P. Raulin, J. Tacza, Pribory i Tekhnika Eksperimenta 5, 96–103 (2020) (In Russ). DOI: 10.31857/S0032816220050298
- 5 Yu.V. Stenkin, V.V. Alekseenko, D.M. Gromushkin, V.P. Sulakov, O.B. Shchegolev, ZhETF 151(5), 845–849 (2017) (In Russ).
- 6 A.A. Shaimerdenov, Sh. Kh. Gizatulin, D.A. Nakipov, E.A. Kenzhin, E.V. Chikhray, Zh.A. Zaurbekova, A.U. Tolenova, E.A. Nesterov, G. Kizane, Vestnik NYATS RK 1, 104–110 (2020) (In Russ). DOI: 10.52676/1729-7885-2020-1-104-111
- 7 A.A. Shaimerdenov, D.A. Nakipov, F.M. Arinkin, Sh.Kh. Gizatulin, P.V. Chakrov, Ye.A. Kenzhin, Phys. Atom. Nucl. 81, 1408–1411 (2018). DOI: 10.1134/S1063778818100162
- 8 M. Brovchenko et al., EPJ Web Conf. 153, Art.No 07030 (2017).
- 9 M. Brovchenko, I. Duhamel, B. Dechenaux, EPJ Web Conf. 153, Art.No 07030 (2017). DOI: 10.1051/epjconf/20171530.
- 10 B.M. van der Ende, L. Li, D. Godin, B. Sur, Nat. Commun. 10, Art.No 1959 (2019).
- 11 P. Raj, M. Angelone, U. Fischer, A. Klix, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 908, 10–17 (2018).
- 12 A. Klix, M. Angelone, U. Fischer, D. Gehre, B. Ghidersa, A. Lyoussi, P. Raj, Th. Reimann, D. Szalkai, K. Tian, IEEE 47, 8 (2015).
- 13 M.V. Filippov, V.S. Makhmutov, Yu.I. Stozhkov, J.-P. Raulin, E.V. Kalinin, Izvestiya RAN, Seriya Fizicheskaya 83(5), 670–672 (2019) (In Russ).
- 14 A. Mukhametkaliuly, Methodology for measuring thermal neutron fluxes using the SNM-18 detector for applied tasks, International Conference of Students and Young Scientists Farabi Alemi, Almaty, 151 (2022) (In Russ).
- 15 V.E. Aleynikov, V.A. Arkhipov, L.G. Beskrovnaya, G.N. Timoshenko, Preprint OIYaI, Dubna 16, 97–158 (1997) (In Russ).
- 16 A.A. Shaimerdenov, F.M. Arinkin, Sh.Kh. Gizatulin, D.S. Dyusambaev, S.N. Koltchnik, P.V. Chakrov, L.V. Chekushina, I.V. Shamanin, Altern. Energy Ecol. 23(187), 51–59 (2015) (In Russ).
- 17 T. Basaglia, Z.W. Bell, P. Dressendorfer, A. Larkin, M. G. Pia, IEEE Trans. Nucl. Sci. 55(2), 671–678 (2008).
- 18 J. Allison et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. 53(1), 270–278 (2006).
- 19 A.V. Tertyshnikov, Helio-Geophys. Res. 13, 42–48 (2015) (In Russ).
- 20 M.V. Filippov, Yu.I. Stozhkov, V.S. Makhmutov, O.S. Maksumov, S.V. Viktorov, A.N. Kvashnin, A.A. Kvashnin, Izvestiya RAN, Seriya Fizicheskaya 79(5), 753–756 (2015) (In Russ).
- 21 S.K. Shinbulatov, N.O. Saduev, O.A. Kalikulov et al., Recent Contributions to Physics, 85(2), 23–28 (2023) (In Russ).
- 22 S.P. Kuznetsov, I.V. Meshkov, S.I. Potashev, Yu.M. Burmistrov, S.Kh. Karaevskiy, Izvestiya RAN, Seriya Fizicheskaya 82(6), 808–810 (2018) (In Russ).

Article history:

Received 10 October 2024
 Received in revised form 29 October 2024
 Accepted 18 December 2024

Мақала тарихы:

Түсті – 10.10.2024
 Түзетілген түрде түсті – 29.10.2024
 Қабылданды – 18.12.2024

Information about authors:

1. **Aliya Baktoraz** (corresponding author) – Researcher, Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan; e-mail: a_baktoraz@mail.ru

2. **Yerzhan Mukhamejanov** – PhD, Leading Researcher, Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan, and Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia; e-mail: y.mukhamejanov@gmail.com

3. **Demezhan Myktybekov** – Researcher, Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan, Junior Researcher, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia; e-mail: demezhan04@mail.ru

4. **Fatima Dankenova** – Junior Researcher, Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan; e-mail: dankenova.fatyma@mail.ru

Авторлар туралы мәлімет:

1. **Бактораз Әлия Есімханқызы** – (автор корреспондент) Ядролық физика институтының ғылыми қызметкері, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: a_baktoraz@mail.ru

2. **Мухамеджанов Ержан Серикович** – PhD, Алматы қаласындағы Ядролық физика институтының және Біріккен ядролық зерттеулер институтының (Дубна қ., Ресей) жетекші ғылыми қызметкері; e-mail: y.mukhamejanov@gmail.com

3. **Мықтыбек Демежан Есенұлы** – Ядролық физика институтының ғылыми қызметкері, Алматы қ., Қазақстан; Біріккен ядролық зерттеулер институтының кіші ғылыми қызметкері, Дубна қ., Ресей; e-mail: demezhan04@mail.ru

4. **Данкенова Фатима Ғалламқызы** – Ядролық физика институтының кіші ғылыми қызметкері, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: dankenova.fatyma@mail.ru