

МРНТИ 29.05.45; 29.15.33; 29.15.39; 58.33.37

<https://doi.org/10.26577/RCPH.2023.v85.i2.04>

С.К. Шинбулатов<sup>1\*</sup>, Н.О. Садуев<sup>1</sup>, О.А. Каликулов<sup>1</sup>, А.Н. Седов<sup>1</sup>,  
В.В. Оскомов<sup>1</sup>, Е.С. Мухамеджанов<sup>2</sup>, А.Е. Бақтораз<sup>1</sup>, Н.О. Ережеп<sup>1</sup>,  
Ш.Б. Утей<sup>1</sup>, А.А. Шаймерденов<sup>3</sup>, М.Т. Айткулов<sup>3</sup>, Д.Е. Мыктыбеков<sup>2</sup>,  
А.И. Жумабаев<sup>1</sup>, А. Мухамедкалиулы<sup>1</sup>, Т.К. Жолдыбаев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>НИИЭТФ, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Казахстан, г.Алматы

<sup>2</sup>Объединенный институт ядерных исследований, Россия, г.Дубна

<sup>3</sup>РГП Институт ядерной физики, Казахстан, г.Алматы

\*email: [saken\\_199303@mail.ru](mailto:saken_199303@mail.ru)

## РАЗРАБОТКА МЕТОДА И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТОКА НЕЙТРОНОВ ОТ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО РЕАКТОРА

В данной работе изучен новый метод измерения потока нейтронов с использованием пропорциональных счетчиков СНМ-18, наполненных <sup>3</sup>Не. При разработке аппаратуры автоматизированного измерения потока нейтронов исследовательского реактора ВВР-К определяющими критериями оптимизации являются потребляемая мощность, масса и габариты. Для этого использовались приборы для автоматизированного измерения эквивалента влажности почвы и эквивалента снеговой воды по нейтронной составляющей космических лучей. Проведен ряд экспериментальных исследований по определению оптимальных уровней питающих напряжений, изменена конструкция устройства для работы на реакторе ВВР-К. Основными элементами конструкции детектора нейтронов являются блок водородосодержащего замедлителя; трубка пропорционального счетчика тепловых нейтронов; усилитель и микроконтроллер для анализа сигнала с детектора; источник питания высокого напряжения и трансмиттер. Также было разработано специальное программное обеспечение для одновременного управления детекторами. Тестовые измерения потока нейтронов выполнены на исследовательской реакторной установке ВВР-К ИЯФ с использованием Pu-Be источника нейтронов, с интенсивностью  $1,8 \cdot 10^6$  н/с. Для снижения интенсивности нейтронов в целях безопасности персонала и снижения нагрузки на детектор источник нейтронов был помещен внутрь коллиматора из борированного полиэтилена.

**Ключевые слова:** поток нейтронов, реактор, пропорциональный счетчик СНМ-18.

С.К. Шинбулатов<sup>1\*</sup>, Н.О. Садуев<sup>1</sup>, О.А. Каликулов<sup>1</sup>, А.Н. Седов<sup>1</sup>,  
В.В. Оскомов<sup>1</sup>, Е.С. Мухамеджанов<sup>2</sup>, А.Е. Бақтораз<sup>1</sup>, Н.О. Ережеп<sup>1</sup>, Ш.Б. Утей<sup>1</sup>,  
А.А. Шаймерденов<sup>3</sup>, М.Т. Айткулов<sup>3</sup>, Д.Е. Мыктыбеков<sup>2</sup>,  
А.И. Жумабаев<sup>1</sup>, А. Мухамедкалиулы<sup>1</sup>, Т.К. Жолдыбаев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ЭТФЗИ, ал-Фараби ат. Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы қ.

<sup>2</sup>Ядролық Зерттеулер Біріккен Институты, Ресей, Дубна қ.

<sup>3</sup>РМК Ядролық физика институты, Қазақстан, Алматы қ.

\*email: [saken\\_199303@mail.ru](mailto:saken_199303@mail.ru)

## Зерттеу реакторынан нейтрондар ағынын өлшеуге арналған әдіс пен жабдықты әзірлеу

Бұл жұмыс негізінде <sup>3</sup>Не толтырылған пропорционалды СНМ-18 есептегіштерін (санағыштарын) қолдана отырып, ондағы нейтрондар ағынын өлшеудің жаңа әдісін зерттелінді. ССР-Қ зерттеу реакторының нейтрондар ағынын автоматтандырылған өлшеу аппаратурасын әзірлеу кезінде тұтынылатын қуат, масса және өлшемдер сияқты оңтайландырудың анықтаушы критерийлері болып табылады. Ол үшін ғарыштық сәулелердің (FC) нейтрондық компоненті бойынша топырақ ылғалдылығы мен қар суының эквивалентін автоматтандырылған өлшеу құралдары қолданылды. Нейтрон

детекторының негізгі құрылымдық элементтері құрамында сүтегі бар модератор блогы, сонлайқ-ақ жылу нейтрондарының пропорционалды есептегіш түтігі нігізінде; детектордан нақты сигналды талдауға арналған күшейткіш және микроконтроллер; жоғары кернеулі қуат көзі және трансмиттер болып табылады. Детекторларды бір уақытта басқаруға арналған арнайы бағдарламалық жасақтама да жасалынды. Нейтрондар ағынын есептеу үшінсынау өлшемдері нейтрондар көзінің, нақтырақ айтқанда Pu-Be көмегімен ядролық физика институты базасында ССР-Қ зерттеу реактор қондырғысында орындалды, қарқындылығы  $1,8 \cdot 10^6$  н/с. Персоналдың қауіпсіздігі және детекторға жүктемені азайту мақсатында нейтрондардың қарқындылығын төмендету үшін нейтрон көзі борланған полиэтилен коллиматорының ішіне, және нейтрондар ағыны бағытын есептеу үшін белсенді аймақ маңына жақын орналастырылды.

**Түйін сөздер:** нейтрон ағыны, реактор, СНМ-18пропорционалды есептегіш.

S.K. Shinbulatov<sup>1\*</sup>, N.O. Saduyev<sup>1</sup>, O.A. Kalikulov<sup>1</sup>, A.N. Sedov<sup>1</sup>,  
V.V. Oskomov<sup>1</sup>, E.S Mukhamejanov<sup>2</sup>, A.E. Baktoraz<sup>1</sup>, N.O. Yerezhep<sup>1</sup>, Sh.B. Utey<sup>1</sup>,  
A.A. Shaimerdenov<sup>3</sup>, M.T. Aitkulov<sup>3</sup>, D.E. Myktybekov<sup>2</sup>,  
A.I. Zhumabayev<sup>1</sup>, A. Mukhametkaliuly<sup>1</sup>, T.K. Zholdybayev<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ETP, Al-Farabi Kazakh National University,

<sup>2</sup>Joint Institute for Nuclear Research, Russia, Dubna

<sup>3</sup>RSE Institute of Nuclear Physics, Kazakhstan, Almaty

\*email: [saken\\_199303@mail.ru](mailto:saken_199303@mail.ru)

### Development of a method and equipment for measuring the neutron flux from a research reactor

In this paper, a new method for measuring the neutron flux using proportional counters SNM-18 filled with  $^3\text{Ne}$  is studied. When developing equipment for automated measurement of the neutron flux of the research reactor VVR-K, the determining optimization criteria are power consumption, weight and dimensions. For this purpose, devices were used for automated measurement of the equivalent of soil moisture and the equivalent of snow water by the neutron component of cosmic rays. A number of experimental studies have been carried out to determine the optimal levels of supply voltages, the design of the device for operation at the VVR-K reactor has been changed. The main elements of the neutron detector design are a block of a hydrogen-containing moderator; a tube of a proportional thermal neutron counter; an amplifier and a microcontroller for analyzing the signal from the detector; a high-voltage power supply and a transmitter. Special software has also been developed for simultaneous control of detectors. Test measurements of the neutron flux were performed at the research reactor plant VVR-K INP using a Pu-Be neutron source, with an intensity of  $1.8 \cdot 10^6$  n/s. To reduce the neutron intensity for the safety of personnel and to reduce the load on the detector, the neutron source was placed inside a boron polyethylene collimator.

**Key words:** neutron flux, reactor, proportional counter SNM-18.

#### Введение

Промышленная деятельность человечества, в том числе атомная и тепловая энергетика, оказывает значительное техногенное воздействие на природную среду. В связи с этим чрезвычайно актуальны исследования воздействия нейтронного потока реакторов на окружающую среду [1]. Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ) видит одним из своих приоритетов развитие инструментария для мониторинга исследовательских реакторов и малых модульных реакторов (ММР) [2-4].

Поскольку исследовательский реактор ВВР-К расположен недалеко от города Алматы,

особенно актуальной задачей становится оценка воздействия потоков нейтронов на окружающую среду.

Реактор ВВР-К [5] представляет собой универсальный исследовательский реактор корпусного типа с легководным замедлителем, теплоносителем и отражателем. Установленная мощность реактора 10 МВт. Высота ядра 600 мм, диаметр 720 мм. Ядро имеет принудительное охлаждение и двухконтурную систему охлаждения. Первый контур реактора замкнут и охлаждается через теплообменники, а второй контур открыт и охлаждается через градирни. Основными текущими целями реактора ВВР-К являются:

– Испытания топлива и конструкционных материалов реакторов четвертого поколения;

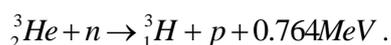
– Испытания материалов термоядерного реактора;

– Производство радиоизотопов для медицины и промышленности;

– Нейтронно-активационный анализ;

В одном из недавних исследований предлагается метод контроля эманации исследовательского реактора, в частности нейтронов, с помощью двух детекторов нейтронов большой площади (площадь регистрации  $18 \times 100 \text{ см}^2$ ) с борным напылением [6].

В данной работе мы представляем экономичное и эргономичное оборудование для регистрации нейтронов. Установка, в отличие от ЛАНД и КамЛАНД [7, 8], состоит из пропорциональных счетчиков СНМ-18 [9], заполненных  $^3\text{He}$  и окруженных полиэтиленовым замедлителем. В детекторе происходит следующая реакция:



Сечение реакции теплового нейтрона с  $^3\text{He}$  равно 5327 барн.

### Инструменты и методы

При разработке аппаратуры автоматизированного измерения потока нейтронов исследовательского реактора ВВР-К определяющими критериями оптимизации являются потребляемая мощность, масса и габариты [10]. Для этого использовались приборы для автоматизированного измерения эквивалента влажности почвы и эквивалента снеговой воды по нейтронной составляющей космических лучей [11–13]. Проведен ряд экспериментальных исследований по определению оптимальных уровней питающих напряжений, изменена конструкция устройства для работы на реакторе ВВР-К. Основными элементами конструкции детектора нейтронов являются блок водородосодержащего замедлителя; трубка пропорционального счетчика тепловых нейтронов; усилитель и микроконтроллер для анализа сигнала с детектора; источник питания высокого напряжения и передатчик сигнала. Подробнее о разработанном усилителе и высоковольтном источнике питания можно узнать в [10,14].

Выравнивающий источник, поддерживающий выходное напряжение путем сравнения напряжения из цепи обратной связи с

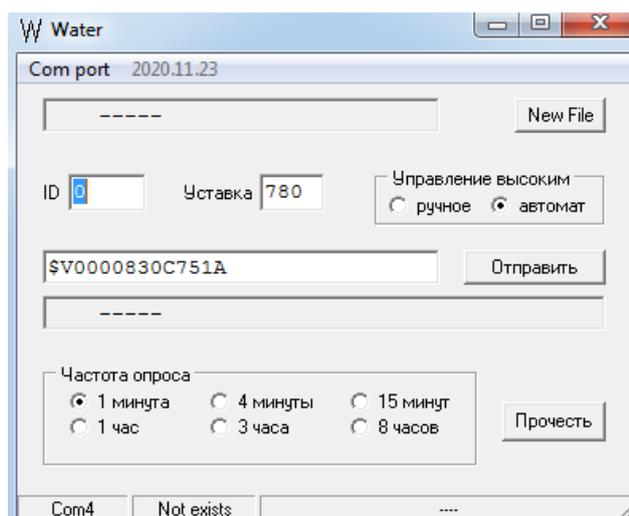
заданным, состоит из транзисторного ключа, повышающего трансформатора (с заданной индуктивностью), выпрямителя и микроконтроллера. Чтобы уменьшить количество аналоговых компонентов, исключили высоковольтный делитель. Отличается тем, что напряжение обратной связи снимается с первичной обмотки повышающего трансформатора.

Источник предназначен для питания счетчиков с очень низким потреблением, при этом основные потери энергии приходятся утечку тока в диодах выпрямителя, который сильно (экспоненциально) зависит от температуры. Ток, подаваемый источником, пропорционален частоте импульсов и обратно пропорционален времени паузы между импульсами.

Поскольку величина высокого напряжения, газового усиления и усиления электроники может меняться в зависимости от температуры и времени, возникает вопрос о необходимости автонастройки. Самый простой способ настройки — это изменение высокого напряжения, управление которым уже присутствует в микроконтроллере. Отсюда следует, что распределение амплитуд импульсов может служить сигналом для регулировки напряжения. Однако, если делать многоканальный анализ, это потребует большого количества вычислительных ресурсов, что увеличит энергопотребление. Поэтому были использованы три встроенных в микроконтроллер компаратора с пороговыми соотношениями 1:5:6.

Полученные и обработанные на электронной аппаратуре сигналы далее оцифровываются через АЦП и записываются в компьютер с помощью специально разработанного программного средства Water для управления несколькими детекторами одновременно.

Для обеспечения связи с детекторами по интерфейсу RS485 по витой паре разработан специальный USB-преобразователь. Для корректной работы конвертера необходимо установить драйвер. Преобразователь изолирует корпус компьютера от кабеля передачи данных и рассчитан на междуфазные напряжения и более того, на грозовые импульсы до 1500 В. Преобразователи комплектуются специальным USB-кабелем длиной 3 или 5 м с низким сопротивлением экрана. Лишняя часть кабеля сворачивается в компактную бухту рядом с преобразователем. В виде бухты кабель имеет большую индуктивность и лучше гасит помехи.



**Рисунок 1** — Программа управления детектором

Специальное программное обеспечение для одновременного управления детекторами (рис. 1). Кнопка «New File» открывает два новых файла, в которые будут записаны данные. Файл \*.log является служебным, содержит всю переписку между компьютером и устройствами. Файл \*.txt содержит чистые данные. В нем есть такие строки (пример для трех детекторов):

```
2020.11.25 18:00 0,2289 0,0522 0,0000 17,0 0,2189
0,0422 0,0000 16,0 0,2211 0,0622 0,0001 17,2
```

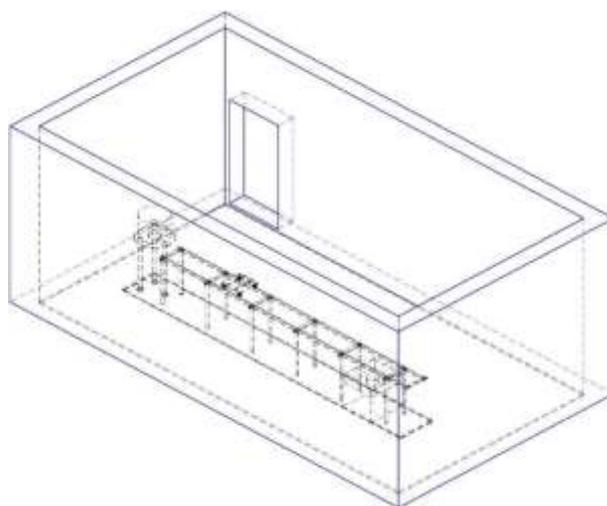
Первые два столбца — это дата и время. Третий, седьмой и одиннадцатый столбцы — скорости счета, что интересно в пересчете на нейтроны в секунду. Остальные столбцы являются диагностическими. Следующую группу столбцов 4, 8, 12 составляют импульсы с амплитудой более 5 раз. Их должно быть в пять раз меньше, чем нейтронов вообще. Пятая группа – 5, 9, 13 очень большие импульсы, их должно быть ноль или очень мало. Группа – 6, 10, 14 – частота импульсов ВН, она должна быть в пределах 0,1...110.

Следующая группа кнопок — управление высоковольтным питанием. ID – номер извещателя, на который отправляется команда. «Уставка» – значение уставки питания высокого напряжения, которое будет отправлено в команде. "ручное - автомат" - управление автоматической регулировкой высоковольтного питания (выкл./вкл.). Кнопка «Отправить» отправляет команду на датчик, который виден в окне слева. Уставка, измененная функцией высокой подстройки, теряется при отключении питания. А настройка, отправленная в команде, запоминается навсегда. Частота опроса - программа смотрит на

часы и если, например, "8 часов", то опросы будут в 00:00, 08:00, 16:00. Кнопка «Прочсть» отправляет команду на чтение вручную, а не по расписанию.

### Измерения источника нейтронов Pu-Be

Тестовые измерения потока нейтронов выполнены на исследовательской реакторной установке ВВР-К ИЯФ с использованием калибровочной установки. Размеры помещения, в котором находится установка, следующие: длина 7356 мм, ширина 3800 мм и высота 3600 мм (рис. 2). Калибровочная установка предназначена для проверки и восстановления параметров (настройки) дозиметрических приборов и оборудования в лабораторных условиях.



**Рисунок 2** — Калибровочная комната для тестовых измерений

В качестве источника нейтронов для тестовых измерений использовался Pu-Be с интенсивностью  $1,8 \cdot 10^6$  н/с. Для снижения интенсивности нейтронов в целях безопасности персонала и снижения нагрузки на детектор источник нейтронов был помещен внутри коллиматора из борированного полиэтилена (рис. 3). Диаметр коллиматора 20 мм, длина 211 мм. Содержание бора в блоках составляет 3%. Бор имеет естественный изотопный состав.

Внутри полиэтиленового блока размещались три счетчика СММ-18. Результаты измерений представлены в табл. 1. Измерения фона, а также измерения скоростей счета нейтронов от Pu-Be источника проводились каждым из трех счетчиков, размещенных внутри полиэтиленового замедлителя, по отдельности и всеми вместе.

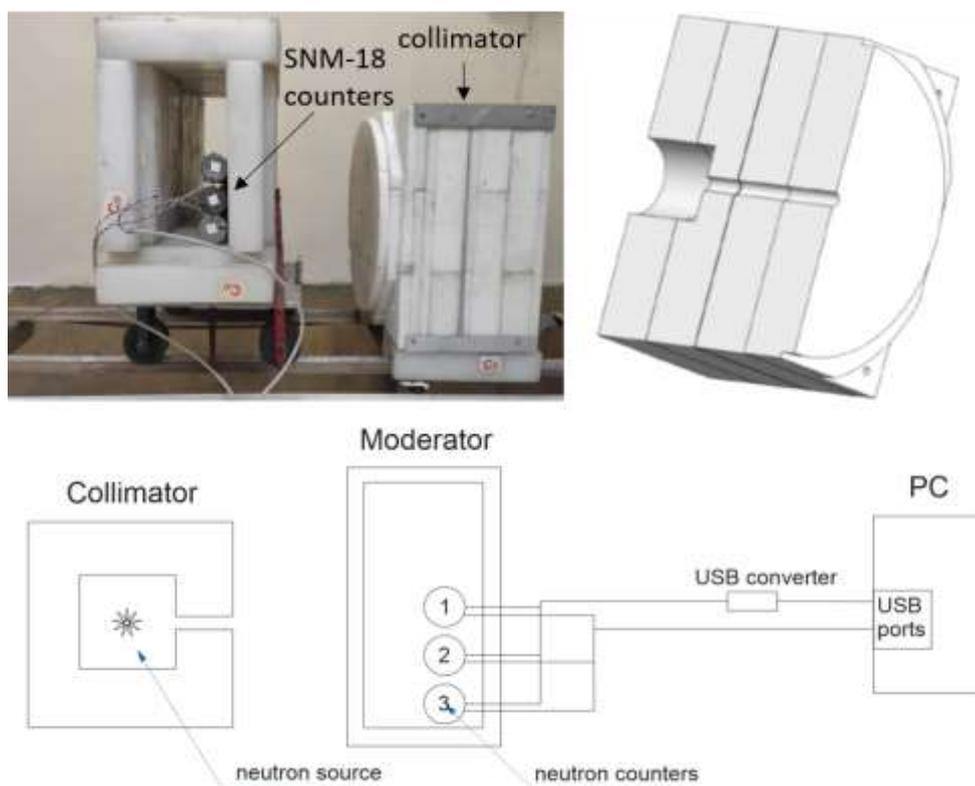


Рисунок 3 — Установка для тестовых измерений

Таблица 1 — Результаты измерения скорости счета нейтронов

	Частота измерений (нейтронов/сек.)		
	1-детектор	2-детектор	3-детектор
Отдельные измерения фона	19.71	21.46	19.49
Одновременные измерения фона	18.74	17.86	15.31
Индивидуальные измерения	276.07	302.41	270.36
Одновременные измерения	234.75	237.21	206.74

Столь значительный фон связан с тем, что в помещении, где проводились измерения, хранится несколько других источников Pu-Be. Видна заметная разница между скоростями счета при индивидуальных и одновременных измерениях.

Одним из важных шагов, который необходимо сделать, является проведение моделирования методом Монте-Карло с использованием GEANT4. Следующей задачей является внедрение разработанных приборов и методики измерения потока нейтронов исследовательского реактора ВВР-К внутри здания реактора и прилегающей территории.

### Заключение

Нами разработано аппаратное и программное обеспечение для реализации нового метода измерения потока нейтронов от исследовательского реактора ВВР-К с использованием пропорциональных счетчиков СНМ-18, заполненных  $^3\text{He}$ . Разработанный метод будет использован для измерения потока нейтронов при эманации нейтронов из реактора.

### Финансирование

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, ПЦФ №BR10965174.

## Литература

- 1 Brovchenko M. et al. Neutron-gamma flux and dose calculations in a Pressurized Water Reactor (PWR) //EPJ Web of Conferences. – 2017. – Vol.153. – Art.No 07030.
- 2 Boyer B. & Schanfein M. In Nuclear Safeguards, Security, and Nonproliferation, edited by James, E.D. – Oxford, UK: Elsevier. – 2008.
- 3 Anzelon G. Antineutrino reactor monitoring in the context of IAEA safeguards //In Workshop on Applied Antineutrino Physics (AAP 2018). – Livermore, CA, USA. – 2018.
- 4 IAEA Department of Safeguards. Long-Term R&D Plan, 2012–2023, STR-375. – IAEA, Vienna, Austria. – 2013.
- 5 Shaimerdenov A. et al. The 50th anniversary of the WWR-K research reactor //Physics of Atomic Nuclei. – 2018. – Vol.81, iss 100.
- 6 B.M. van der Ende et al. Stand-off nuclear reactor monitoring with neutron detectors for safeguards and non-proliferation applications //Nature Communications. – 2019. – Vol.10. – P.1959.
- 7 Blaich Th. et al. A large area detector for high-energy neutrons, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – 1992. – 314. – P.136-154.
- 8 Kozlov A., Chernyak D. A large area detector for thermal neutron flux measurements at the KamLAND site // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research A. – 2018. – Vol.903. – P.162-169.
- 9 Aleinikov V.E. et al. Characteristics of gas-discharge counters of slow neutrons when operating in fields with a high level of gamma background //Preprint JINR, Dubna. – 1997. – P16. – P.97-158.
- 10 Saduyev N.O. et al. Development of an Automated System for the Determination of the Snow Water Equivalent and Soil Moisture by the Neutron Component of Cosmic Rays //Acta Physica Polonica B. – 2020. – Vol. 51, No. 3. – P.887-892.
- 11 Оскомов В.В. и др., Микромощные узлы радиоэлектронного тракта нейтронного Детектора // Известия НАН РК, серия физико-математическая. – 2014. – № 294. – С.69-73.
- 12 Oskomov V.V. et al. Data collection system for a wide range of gas-discharge proportional neutron counters //J. Phys.: Conf. Ser. – 2017. – Vol.936. – Art.No.012047.
- 13 Oskomov V.V. et al., Investigation of soil moisture, snow water equivalent and glacier ablation using neutrons and cosmic ray muons. – Research Report No. 0115RK01025. – 2017.
- 14 Saduyev N.O. et al., Patent for utility model. «National Nanotechnology Laboratory Of Open Type» Subsidiary State Enterprise on the Right of Economic Management of «Al-Farabi Kazakh National University» Republican State Enterprise on the Right of Economic Management of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan., No 5797. – 2021.

## References

- 1 M. Brovchenko et al., Web of Conferences, 153, 07030 (2017).
- 2 B. Boyer & M. Schanfein, In Nuclear Safeguards, Security, and Nonproliferation, edited by James, E.D. (Elsevier, Oxford, UK, 2008).
- 3 G. Anzelon, Antineutrino reactor monitoring in the context of IAEA safeguards, In Workshop on Applied Antineutrino Physics (AAP 2018), (Livermore, CA, USA, 2018).
- 4 IAEA Department of Safeguards. Long-Term R&D Plan, 2012–2023, STR-375, IAEA, Vienna, Austria, (2013).
- 5 A. Shaimerdenov et al., Physics of Atomic Nuclei, 81(10) (2018).
- 6 B.M. van der Ende et al., Nature Communications 10, 1959 (2019).
- 7 Th. Blaich et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 314, 136-154 (1992).
- 8 A. Kozlov, D. Chernyak A large area detector for thermal neutron flux measurements at the KamLAND site, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A. 903 (2018).
- 9 V.E. Aleinikov et al., Characteristics of gas-discharge counters of slow neutrons when operating in fields with a high level of gamma background, Preprint JINR, Dubna, P16, 97-158 (1997).
- 10 N.O. Saduyev et al., Acta Physica Polonica B51, 3, 887-892 (2020).
- 11 V.V. Oskomov et al., News NAS RK, Phys. Math. 294, 69-73 (2014) (in Russ).
- 12 V.V. Oskomov et al., J. Phys.: Conf. Ser. 936, 012047 (2017).
- 13 V.V. Oskomov et al., Investigation of soil moisture, snow water equivalent and glacier ablation using neutrons and cosmic ray muons, Research Report No. 0115RK01025, (2017).
- 14 N.O. Saduyev et al., Patent for utility model, («National Nanotechnology Laboratory Of Open Type » Subsidiary State Enterprise on the Right of Economic Management of «Al-Farabi Kazakh National University» Republican State Enterprise on the Right of Economic Management of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan), No 5797, (2021).