

**NEWS**

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN  
**PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES**

ISSN 1991-346X

Volume 2, Number 336 (2021), 152 – 156

<https://doi.org/10.32014/2021.2518-1726.35>

УДК 539.12

МРНТИ 29.05.01, 29.05.27

**Л.И. Вильданова, О.А. Новолодская, Т. Х. Садыков, Д.О. Кантарбаева**

Satbayev University, Физико-технический институт, Алматы, Казахстан.

E- mail: din.orazbaevna@gmail.com

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕГИСТРАЦИИ НЕЙТРОНОВ  
НИЗКОЙ ЭНЕРГИИ НЕЙТРОННЫМИ ДЕТЕКТОРАМИ  
НА ОСНОВЕ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ СЧЕТЧИКОВ  $^3\text{He}$**

**Аннотация.** При анализе результатов, получаемых в измерениях на нейтронных детекторах с низким энергетическим порогом, необходимо знать зависимость эффективности регистрации нейтронов от их кинетической энергии в информационных каналах различного типа, как для «открытых» нейтронных счетчиков, так для счетчиков, окруженных замедлителем. Имея построенную на основе пакета Geant4 физическую модель взаимодействия частиц, можно провести расчет эффективности регистрации для различных типов детекторов, которые применяются в проводимых на Тянь-Шаньской высокогорной станции экспериментах, связанных с регистрацией нейтронного потока. В работе представлено несколько программных моделей, разработанных для нейтронных детекторов.

**Ключевые слова:** нейтрон, нейтронный детектор, нейтронный монитор, эффективность регистрации, физическая модель.

**Введение.** В исследованиях, проведенных на ливневой установке, расположенной на Тянь-Шаньской высокогорной научной станции, были получены свидетельства об аномально высокой множественности испарительных нейтронов, которые генерируются внутри нейтронного монитора при попадании в него стволов широких атмосферных ливней [1-3]. В результате возник вопрос о поведении низкоэнергичной составляющей нейтронного потока (тепловых нейтронов), сопровождающего прохождение ШАЛ [4]. В соответствии с этим, на Тянь-Шаньской станции проводится эксперимент по детектированию тепловых нейтронов и связанного с ними потока низкоэнергичных гамма-квантов в центральной области ШАЛ [5-7]. Для регистрации нейтронов низкой энергии используется система специальных нейтронных детекторов на основе газоразрядных счетчиков  $^3\text{He}$ , которые, в отличие от конфигурации нейтронного монитора, работают вне каких-либо слоев тяжелого вещества мишени и легкого замедлителя. В этом случае роль мишени для взаимодействия энергичных адронов космических лучей играют окружающие детектор объекты, прежде всего, грунт Тянь-Шаньской станции, а замедление образующихся в этих реакциях испарительных нейтронов происходит непосредственно при их распространении во внешней среде. Такая конструкция обеспечивает минимальный порог регистрации, и наиболее эффективным подобный детектор оказывается в тепловом диапазоне энергий (порядка  $10^{-2}$  эВ) налетающих нейтронов.

**Модель нейтронного детектора**

Основой для расчетов служит модель нейтронного счетчика ПД631, которая представлена на рисунке 1.

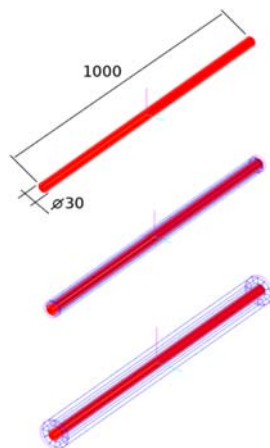


Рисунок 1 - Геометрическая модель нейтронного счетчика ПД631

Геометрия счетчика определялась в виде цилиндра с диаметром 30 мм и длиной 1000 мм. Предполагается, что ограничивающая цилиндрический объем внешняя оболочка состоит из алюминия толщиной 1 мм. Внутреннее пространство модельного счетчика полагается заполненным смесью аргона и гелия с параметрами (давление, температура, химический и изотопный состав), соответствующими характеристикам реальных счетчиков ПД631. Вместе с базовой моделью «открытого» счетчика рассматриваются также и счетчики, находящиеся внутри цилиндрического замедлителя нейтронов. В соответствии с конфигурацией реальных детекторов, в двух вариантах модели рассматриваются замедлители в виде цилиндрических труб из поливинилхлорида (ПВХ) с толщиной стенки 6 мм и из парафина толщиной 20 мм. Помимо отдельных счетчиков ПД631, расчеты проводились для нейтронного детектора в сборе. Модель для такого варианта расчетов показана на рисунке 2.

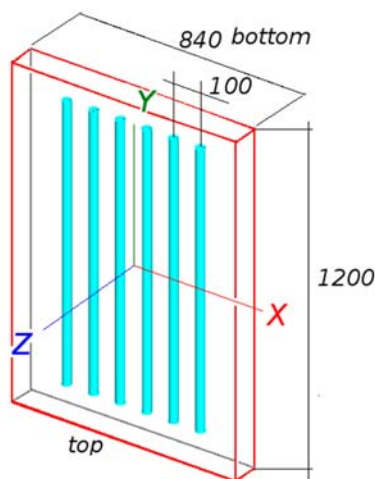


Рисунок 2 - Геометрическая модель нейтронного детектора в сборе

В этой геометрии отдельные счетчики располагаются в ряд на расстоянии 10 см друг от друга таким образом, чтобы их оси были параллельны, и весь их набор помещался внутри алюминиевого контейнера с размерами  $120 * 84 * 10 \text{ см}^3$  и с толщиной стенки 2 мм. Предполагается, что вмещающий контейнер заполнен атмосферным воздухом, находящимся при нормальных условиях.

### Расчет эффективности регистрации нейтронов

Серия расчетов для всех вариантов модельных детекторов состояла из ряда отдельных розыгрышей (порядка  $10^6$  модельных событий), в каждом из которых на детектор падали первичные нейтроны с одной и той же кинетической энергией  $E_n$ . Как траектория самого

первичного нейтрона, так и траектории образованных в результате его взаимодействий частиц-продуктов отслеживались целиком на протяжении всего расчетного события. В соответствии с принципом работы реальных счетчиков ПД631, действие которых основано на ядерной реакции  $n(^3\text{He}, ^3\text{H}) p$ , критерием «регистрации» первичного нейтрона в модельном детекторе служило появление среди частиц-продуктов пары заряженных частиц протон/тритон во внутреннем объеме одного из нейтронных счетчиков. В качестве оценки для эффективности регистрации  $\varepsilon(E_n)$  данной конфигурации детектора по отношению к нейтронам с энергией  $E_n$  использовалось отношение количества «зарегистрированных» нейтронов к общему числу разыгранных событий. Таким образом, как вероятность развития электронной лавины внутри газоразрядного счетчика при образовании внутри него пары заряженных ядер, так и вероятность генерации вследствие этого счетчиком электрического импульса на его анодной нити полагались стопроцентными, а какое-либо влияние формирующих сигналы электронных цепей на эффективность детектора не учитывалось.

Для исследования характеристик нейтронного детектора, соответствующих различным условиям постановки эксперимента, были проведены три серии модельных расчетов. В расчетах первой серии с «оптимальными» начальными условиями исходное положение всех первичных нейтронов в начале каждого розыгрыша задавалось непосредственно на поверхности цилиндрической стенки «открытого» счетчика, а их импульс всегда был направлен в сторону внутреннего пространства счетчика, по нормали к его поверхности. Целью этих расчетов было определить энергетическую зависимость эффективности одного индивидуально взятого нейтронного счетчика ПД631, который рассматривается вне зависимости от какого-либо внешнего окружения.

Во второй серии расчетов шесть модельных счетчиков объединялись в единую модель нейтронного детектора в соответствии с требованиями большинства экспериментов на Тянь-Шаньской научной станции. В качестве начального положения первичных нейтронов в этом варианте расчетов использовались случайные точки на внешней поверхности, содержащей набор счетчиков алюминиевой коробки, а направление вектора начального импульса для первичных частиц задавалось путем розыгрыша значений его направляющих косинусов согласно равномерному распределению на интервале  $[0;1]$ . Таким образом, данный вариант расчетов соответствует случаю детектора из шести счетчиков ПД631 в сборе, помещенному в изотропный поток налетающих нейтронов. Очевидно, что наличие пространственных зазоров между отдельными счетчиками в составном детекторе, который рассматривается как единое целое, а также случайное распределение направлений движения первичных частиц в этом варианте расчетов должны приводить к тому, что суммарная эффективность регистрации нейтронов для такого детектора должна быть заметно ниже, чем в случае «оптимальной» конфигурации пучка первичных нейтронов для единственного счетчика.

В третьем варианте расчетов были учтены специфические условия измерений, которые проводятся на установках Тянь-Шаньской высокогорной станции. Поскольку основное назначение таких установок заключается в регистрации частиц широких атмосферных ливней, естественно ожидать, что среди потока налетающих на детектор нейтронов могут преобладать частицы, движущиеся в вертикальном направлении. В этом случае вместо расчетов с полностью изотропным начальным распределением первичных частиц может оказаться более адекватным моделирование, при котором положение первичных нейтронов задается случайным образом на поверхности только одной из сторон модельного детектора из четырех, а распределение их первичных импульсов строго фиксировано: все первичные частицы в начальный момент времени движутся параллельно оси  $Z$ , в сторону, противоположную ее направлению. Такое начальное распределение первичных нейтронов было принято в третьей серии модельных расчетов.

Результаты, полученные при моделировании процесса регистрации нейтронов для всех трех вариантов конфигурации детектора, представлены на рисунке 3.

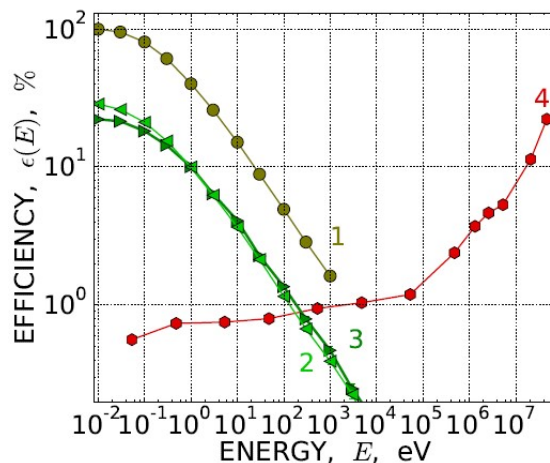


Рисунок 3 - Эффективность регистрации нейтронов детекторами различных конфигураций по результатам модельных расчетов.

1 – нейтронный счетчик ПД631 без замедлителя; 2 и 3 – нейтронный детектор из шести счетчиков ПД631 в перпендикулярном его «верхней» поверхности и в изотропном потоке нейтронов; 4 – нейтронный монитор NM64

Линией (1) на графике рисунка 3 показана энергетическая зависимость эффективности счетчика ПД631 по отношению к регистрации нейтронов при максимально благоприятных начальных условиях (первичный нейтрон, находящийся непосредственно на поверхности счетчика с направленным по нормали к его поверхности импульсом). Как видно по этому графику, в таком «оптимальном» варианте расчетов, который играет роль верхнего предела для возможной эффективности, результирующее распределение достигает практически 100% в диапазоне тепловых энергий, спадает до 50% при энергии порядка 1 эВ и до 1% - в области нескольких кэВ.

В более реалистичном варианте расчетов с изотропным начальным распределением положений и импульсов первичных частиц, результаты которых показаны линией (2) на рисунке 3, зависимость суммарной эффективности детектора из шести разделенных зазорами счетчиков ПД631 сохраняет свой максимум в области тепловых энергий, но величина этого максимума снижается до уровня порядка 20%. Практически такими же значениями эффективности оказываются и в случае равномерного распределения первичных частиц по верхней стороне детектора, как это отражено на рисунке 3 линией (3). Таким образом, согласно данным модельного расчета, оказывается, что вероятность регистрации нейтронов в детекторе практически не зависит от вида углового распределения налетающего на детектор нейтронного потока.

Для сравнения, на том же рисунке 3 посредством линии (4) показана энергетическая зависимость эффективности регистрации нейтронов, которая была получена при моделировании нейтронных взаимодействий для конфигурации супермонитора NM64 в области низких энергий налетающей частицы. Как следует из этой зависимости, эффективность нейтронного супермонитора демонстрирует поведение, прямо противоположное случаю низкого порога детектора: она остается незначительной вплоть до энергии  $E_n \approx 0,1-1$  МэВ, а затем начинает расти по мере увеличения множественности испарительных нейтронов, которые образуются при инициированных энергичными адронами ядерных реакциях внутри тяжелого поглотителя монитора. Таким образом, нейтронный монитор и детекторы на основе не экранированных каким-либо веществом нейтронных счетчиков взаимно дополняют друг друга по своим возможностям.

**Выводы.** Представленные в работе результаты означают, что сам по себе детектор на счетчиках ПД631 обладает заметной эффективностью с вероятностью регистрации нейтронов  $\geq 1\%$ , в энергетическом диапазоне, который начинается с тепловых значений и продолжается вплоть до 0,1- 0,3 кэВ. При этом подобный детектор оказывается наиболее чувствительным к нейтронам, обладающим кинетическими энергиями  $E_n \approx 0,01-0,1$  эВ, а в области больших энергий его эффективность уменьшается обратно пропорционально  $\sqrt{E_n}$ .

Данная работа выполнена при поддержке грантового финансирования КН МОН РК, № AP08955730.

Л.И. Вильданова, О.А. Новолодская, Т. Х. Садыков, Д.О. Кантарбаева

Satbayev University, Физика-техникалық институты, Қазақстан, Алматы

**ГАЗ РАЗРЯДТЫ <sup>3</sup>HE ЕСЕПТЕГІШТЕРІ НЕГІЗІНДЕ ТӨМЕН ЭНЕРГИЯЛЫ  
НЕЙТРОНДАРДЫ НЕЙТРОНДЫҚ ДЕТЕКТОРМЕН ТІРКЕУДІҢ ТИІМДІЛІГІ**

**Аннотация.** Энергия шегі төмен нейтрондық детекторлардағы өлшеулерден алынған нәтижелерді талдау кезінде "ашық" нейтрондық есептегіштер үшін де, баяулатқышпен қоршалған есептегіш үшін де әр түрлі типтегі ақпараттық каналдардағы нейтрондарды анықтау тиімділігінің олардың кинетикалық энергиясына тәуелділігін білу қажет. «Geant4» пакеті негізінде тұрғызылған бөлшектердің өзара әрекеттесуінің физикалық моделіне ие бола отырып, Тянь-Шань биік станциясында нейтрондар ағынының тіркелуіне байланысты жүргізілген тәжірибелерде қолданылатын детекторлардың әр түрлі типтері үшін анықтау тиімділігін есептеуге болады. Мақалада нейтрондық детекторлар үшін жасалған бірнеше бағдарламалық жасақтама ұсынылған.

**Түйін сөздер:** нейтрон, нейтрон детекторы, нейтрон монитормен, тіркеу тиімділігі, физикалық модель.

L.I. Vildanova, O.A. Novolodskaya, T. Kh. Sadykov, D.O. Kantarbayeva

Satbayev University, Institute of Physics and Technology, Almaty, Kazakhstan

**EFFICIENCY OF REGISTRATION OF LOW ENERGY NEUTRONS  
BY NEUTRON DETECTORS BASED ON GAS DISCHARGE <sup>3</sup>He COUNTERS**

**Abstract.** When analyzing the results obtained in measurements on neutron detectors with a low energy threshold, it is necessary to know the dependence of the neutron detection efficiency on their kinetic energy in information channels of various types, both for "open" neutron counters, and for counters surrounded by a moderator. Having a physical model of particle interactions based on the Geant4 package, it is possible to calculate the detection efficiency for various types of detectors, which are used in experiments conducted at the Tien Shan high-mountain station related to the registration of a neutron flux. The paper presents several simulation models developed for neutron detectors.

**Key words:** neutron, neutron detector, neutron monitor, registration efficiency, physical model.

**Information about authors:**

Vildanova L.I. Candidate of Physical and Mathematical Sciences; Satbayev University, Institute of Physics and Technology, Almaty, Kazakhstan; ludmilavildanova@yandex.kz; <https://orcid.org/0000-0001-8558-9026>;

Novolodskaya O.A. Candidate of Physical and Mathematical Sciences; Satbayev University, Institute of Physics and Technology, Almaty, Kazakhstan; novololga@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1978-2781>;

Sadykov T.Kh. Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Satbayev University, Institute of Physics and Technology, Almaty, Kazakhstan; turlan43@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4349-4616>;

Kantarbayeva D.O. Junior researcher Institute of physics and technology, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, din.orazbaevna@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3891-8733>

**REFERENCES**

[1] Antonova V.A., Chubenko A.P., Kokobaev M.M. Phenomenon of the anomalous delay of hadronic and electronic components of EAS // Nucl. Phys. B. 1999. Vol. 75A. p. 333–335.

[2] Antonova V.P., Chubenko A.P., Kryukov S.V. Anomalous time structure of extensive air shower particle flows in the knee region of primary cosmic ray spectrum // J. Phys. G. 2002. Vol. 28, no. 2. p. 251–266.

[3] Chubenko A.P., Shepetov A L., Antonova V.P. The modern status of anomalous delayed particles effect in the knee region EAS according to the data of Tien Shan Mountain Station // Proceedings of the 28th ICRC. Vol. 3 (HE). Tsukuba, Japan: 2003. p. 69–72.

[4] Antonova V.P., Beisembayev R.U., Borisov A.S., Chubenko A.P., Dalkarov O.D., Kryakynova O.N., Mukhamedshin R.A. New complex EAS installation of the Tien Shan mountain cosmic ray station // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2016. Vol. 832. p. 158–178.

[5] Ryabov V.A., Almenova A.M., Antonova V.P., Beisembayev R.U., Bezshapov S.P., Borisov A.S., Chubenko A.P., Dalkarov O.D. Modern status of the Tien-Shan cosmic ray station // EPJ Web of Conferences. 2017. 145, 12001.

[6] Shepetov A., Chubenko A., Iskakov B., Kalikulov O., Mamina S., Mukashev K., Piscal V., Ryabov V., Saduyev N., Sadykov T., Salikhov N., Tautaev E., Vil'danova L., Zhukov V. Measurements of the low-energy neutron and gamma ray accompaniment of extensive air showers in the knee region of primary cosmic ray spectrum. // Eur. Phys. J. Plus. – 2020.- Vol.135. - No 96.

[7] Argyonova A.Kh., Iskakov B., Jukov V.V., Mukashev K.M., Muradov A.D., Piskal V.V., Saduyev N.O., Sadykov T.X., Salihov N.M., Serikkanov A.S., Tautaev E.M., Umarov F.F. The perspective fundamental cosmic rays physics and astrophysics investigations in the Tien-Shan high-mountain scientific station. // News of the National academy of sciences of the Republic of Kazakhstan - Series of geology and technical sciences. 2019. Vol.6, No. 438. P. 121-138. <https://doi.org/10.32014/2019.2518-170X.163>