

Исследование чувствительности и оценка ресурсных характеристик блока детектирования на основе коронных счетчиков СНМ-11

Ю.С. Коптелов, А.Ю. Миронов, Ю.Б. Прохоров, И.А. Щебатулин

Закрытое акционерное общество “СНИИП-СИСТЕМАТОМ”

Россия, Москва, 123060, ул. Расплетина д.5, стр.10

E-mail: USKoptelov@gmail.com

В работе приведены расчеты по выгоранию радиатора счетчика СНМ-11 в потоке тепловых нейтронов при номинальном уровне мощности ВВЭР-1000. Произведена оценка срока полного выгорания радиатора, а также изменение чувствительности измерений при расходе ядер бора-10. Произведен расчет и обоснован выбор материалов и составных частей корпуса, оптимального количества счетчиков блока детектирования.

Ключевые слова: СУЗ, АКНП, блок детектирования, счетчик СНМ 11, чувствительность, скорость выгорания, ресурс.

Введение

Повышение технических и эксплуатационных характеристик аппаратуры контроля нейтронного потока (АКНП) для СУЗ АЭС с ВВЭР и ИЯР в России и за рубежом вот уже 45 лет является первостепенной задачей для ЗАО “СНИИП-СИСТЕМАТОМ” (ССА) (до 1994 года отделение НИЦ СНИИП).

За истекший период выработаны структурные, технические и конструктивные решения АКНП, подтвержденные длительным сроком эксплуатации [1].

На основе информации каналов АКНП в ССА при научном руководстве РИЦ-КИ разработаны и введены в эксплуатацию системы энергораспределения и шумовой диагностики для ВВЭР, не имеющие аналогов в мире [2].

Одной из составных частей АКНП является устройство детектирования (УД), предназначенное для преобразования плотности потока тепловых нейтронов в нормализованный электрический сигнал (импульсы равной амплитуды и длительности).

Для решения задач детектирования в АКНП ССА, как правило, применяются токовые камеры КНК-53М, КНК-17, КНК-4, импульсно-токовая камера КНУ 3, борные коронные СНМ-11 и гелиевые СНМ-18 пропорциональные счетчики.

ССА имеет положительный опыт работы АКНП на АЭС “Богунце” с блоком детектирования с борным счетчиком CPNB фирмы PHOTONIS [4].

Одной из насущных задач является повышение чувствительности при сохранении и расширении диапазона контроля и показателей надежности УД АКНП в диапазоне источника с применением отечественных комплектующих изделий.

Как правило, для контроля плотности потока тепловых нейтронов до пуска реактора на ВВЭР используются УД с коронными счетчиками СНМ-11, применение которых обусловлено относительно высокой чувствительностью, но ограничивается

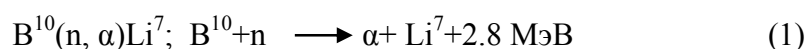
эксплуатационными характеристиками [5], вследствие чего УД разрабатывались с перемещаемыми блоками детектирования.

Рассмотрим характеристики блока детектирования на основе нескольких коронных счетчиков СНМ-11 в одном конструктивном исполнении, обоснуем возможность создания перемещаемой конструкции УД, требования к конструктивным материалам применительно для реакторов ВВЭР-1000.

Оценим скорость выгорания ядер бора-10 и определим ожидаемую величину потери чувствительности при пассивном нахождении счётчика в рабочем положении и выключенном высоком напряжении.

Определение скорости выгорания ядер бора-10

Физический процесс, используемый для получения сигнала в счётчике нейтронов, представляет собой реакцию взаимодействия нейтронов с ядрами бора-10 [6].



Для обеспечения максимально достижимой чувствительности толщина слоя бора должна быть больше, но не должна значимо превышать длин свободного пробега α -частицы, чтобы она не поглотилась следующим атомом бора в нанесенном слое. Появляется задача оптимизации. Примем в качестве критерия толщину слоя равной длине свободного пробега α -частицы в веществе и оценим число ядер бор-10. Длину свободного пробега α -частицы в исследуемой среде можно вычислить из следующего соотношения [7]:

$$l_{\alpha} = \frac{10^{-4} \cdot \sqrt{A E_{\alpha}^3}}{\rho} \quad (2)$$

где l_{α} – длина свободного пробега α -частицы;
 A – атомная масса среды;
 ρ – плотность среды;
 E_{α} – энергия α -частицы.

Для среды, состоящей из атомов бора-10, эти показатели следующие [8]:

$$\begin{aligned} A_{\text{B}^{10}} &= 10,0 \text{ г}; \\ \rho &= 2.34 \text{ г/см}^3; \\ E_{\alpha} &= 2.8 \text{ МэВ}, \end{aligned}$$

подставив значения, получим

$$l_{\alpha} = \frac{10^{-4} \cdot \sqrt{10 \cdot 2.8^3}}{2.34} = 6.3317 \cdot 10^{-4} \text{ см} \approx 6.33 \text{ мкм}$$

$l_{\alpha} = 6.33 \cdot 10^{-4}$ см, следовательно, объем, который пройдет α -частица равен $6.33 \cdot 10^{-4} \text{ см}^3$, тогда на 1 см^2 приходится следующее количество бора-10:

$$m_{\text{B}^{10}} = 6.33 \cdot 10^{-4} \cdot 2.34 \approx 14.8162 \cdot 10^{-4} \text{ г} \approx 1481.62 \text{ мкг}$$

Теперь рассчитаем площадь боковой поверхности [10], на которой нанесен бор-10, счетчик представляет собой цилиндр высотой 33.6 см [5]:

$$S_{\text{цил.бок.}}=2 \cdot \pi \cdot r \cdot h=195.18 \text{ см}^2 ,$$

Где $d_{\text{осн}}=18.5 \text{ мм}=1.85 \text{ см};$
 $r=0.925 \text{ см}.$

На поверхности цилиндра нанесено

$$14.8162 \cdot 10^{-4} \cdot 195.18=0.28918 \text{ г} \sim 0.29 \text{ г бора-10}.$$

На 10 г бора приходится $6.02 \cdot 10^{23}$ ядер (молекул), (число Авогадро) [9];
 На 0.29 г приходится $N_B = 0.174088 \cdot 10^{23}$ ядер.

Теперь рассчитаем сколько атомов бора выгорит за 1 секунду в потоке нейтронов $n=2.2 \cdot 10^9 \text{ н} \cdot \text{см}^2/\text{с}$ [12], взяв интеграл по времени $\int n(t)$, получим на 1 см^2 попадает $2,2 \cdot 10^9$ нейтронов в сек, $s=6 \pm 2$ – чувствительность, которую должен выдавать датчик в заданном потоке.

Число взаимодействий K за секунду нейтронов и атомов бора равно:

$$K=n \cdot S_{\text{цил.бок.}} \cdot s=2.2 \cdot 10^9 \cdot 195.18 \cdot 6=2576.41 \cdot 10^9 = 2.58 \cdot 10^{12} \text{ 1/с}$$

Оценим, за какое время чувствительность изменится на приемлемо малую величину от начального значения при полученной скорости выгорания ядер бора-10.

За год выгорит:

$$2.58 \cdot 10^{12} \cdot 3.15 \cdot 10^7 = 8.127 \cdot 10^{19} \text{ ядер}$$

Следовательно, после года работы датчика на поверхности счетчика останется

$$N_B = 17.3275 \cdot 10^{21},$$

т.е. за год выгорит $\approx 0.5\%$ ядер бора-10, следовательно, чувствительность ухудшится приблизительно так же.

Данные расчеты указывают на возможность применить счетчик СНМ-11 в конструкции нового невыгружаемого блока детектирования в новых условиях эксплуатации.

Выбор материалов для блока детектирования

Так же важным параметром для разрабатываемого блока детектирования является выбор материала для составных частей конструкции.

Изначально основным материалом был алюминиевый сплав, а сам блок детектирования перемещался по каналу. Сегодняшние условия эксплуатации не позволяют его перемещать, поэтому использовать алюминиевый сплав нецелесообразно. Так же недостатком является плохая свариваемость алюминиевых сплавов, т.к. очень сложно произвести сварку без микротрещин, т.е. нельзя обеспечить герметичность блока детектирования.

Оптимальным материалом для разрабатываемого БД по-прежнему остается нержавеющая сталь 12Н18Н10Т.

Этот материал обладает следующими свойствами:

- коррозионной стойкостью без дополнительных гальванических покрытий;
- выдерживает влияние высоких температур до 600°C и давления до 850МПа;
- обладает хорошей свариваемостью.

Расчет толщины стенки корпуса нового невыгружаемого блока детектирования

Рассчитаем оптимальную толщину стенки корпуса для разрабатываемого блока детектирования. Воспользуемся следующей формулой для расчета [11]:

$$s = \frac{P \cdot D \cdot n}{2 \cdot \sigma_B} \quad (3)$$

где s – толщина стенки цилиндрического корпуса;
 P – рабочее давление в МПа;
 D - наружный диаметр трубы, мм;
 n - запас прочности;
 σ_B - временное сопротивление при растяжении, МПа.

Для режима “большой” аварии эти параметры следующие [12]

$P = 0,51$ МПа;

$D = 65$ мм;

$n = 25$;

$\sigma_B = 540$ МПа.

Подставив значения в формулу 3 получим:

$$s = \frac{0,51 \cdot 65 \cdot 25}{2 \cdot 540} = 0,7674 \text{ мм}$$

Примем толщину стенки равной $s=0,77$ мм.

Сравнение чувствительностей

Сравним чувствительности блоков детектирования в зависимости от материала корпуса – алюминий и нержавеющая сталь. В качестве детектора будем использовать один и тот же пропорциональный счетчик нейтронов, помещая его поочередно в колбы, изготовленные из разных материалов.

Для создания потока тепловых нейтронов использовалась установка УРН-1 (фото 1), представляющую собой полиэтиленовый куб с установочной нишей под источник нейтронов. В качестве источника нейтронов применялся плутоний-бериллиевый источник, обеспечивающий поток тепловых нейтронов в месте расположения блока детектирования в замедлителе - $1017 \pm 10\%$ нейтрон/см²·с [3]. Определяли скорость счета, т.е. при неизменном пороге дискриминации выше уровня шумов коронного разряда сняли показания числа импульсов в секунду [12]. Все испытания проводились в контролируемых нормальных лабораторных условиях.



Фото 1 Общий вид УРН-1 с размещенном блоком детектирования.

Структурная схема и внешний вид измерительного стенда приведены на рис. 1 и фото 2 соответственно.

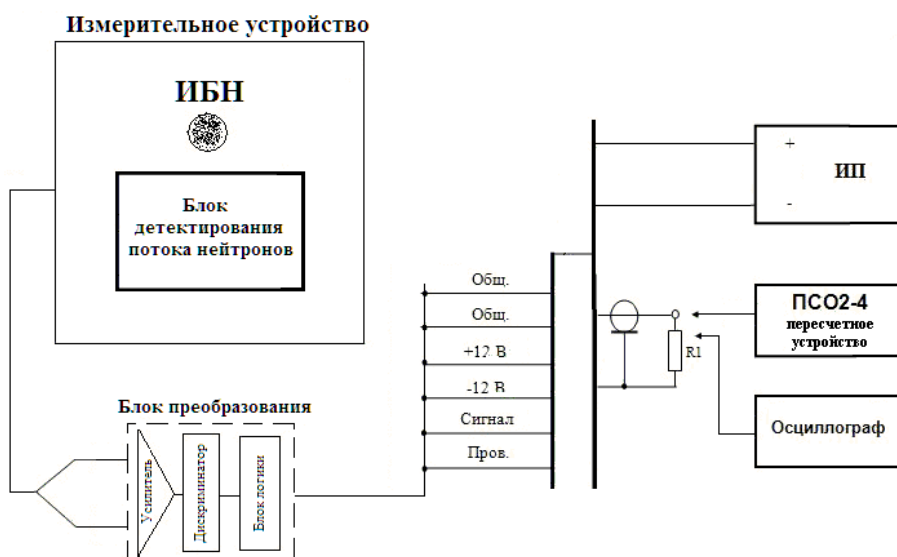


Рис. 1 Структурная схема измерительного стенда

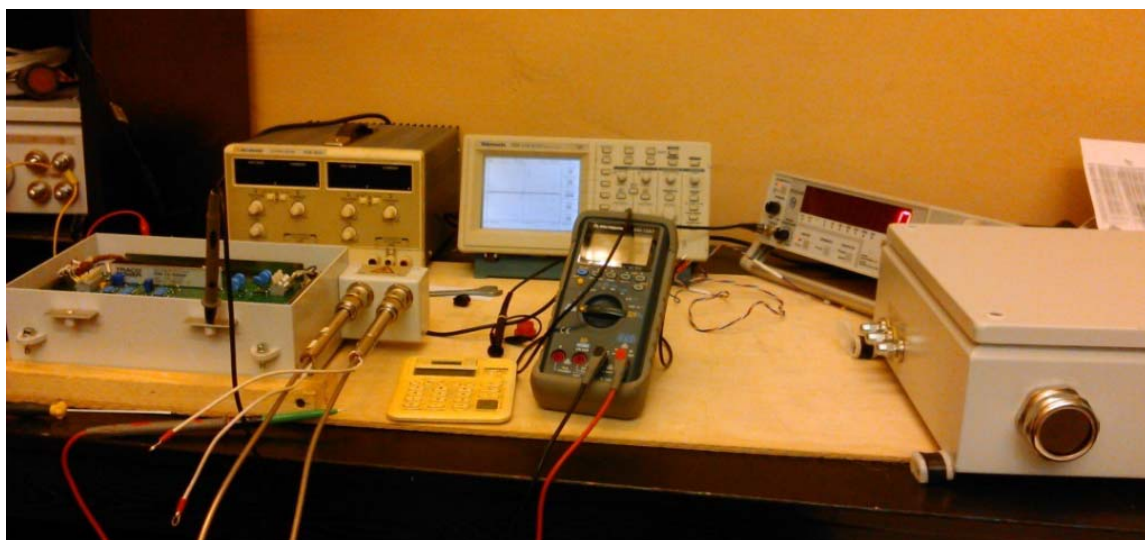


Фото 2 Внешний вид измерительного стенда.

Проводили по пять измерений при каждом уровне дискриминации. При этом сняли дискриминационные характеристики с источником нейтронов.

На рис. 2 в качестве примера приведен выходной сигнал на линейном выходе импульсного усилителя от нейтронов и шумов коронного разряда счетчиков СММ-11.

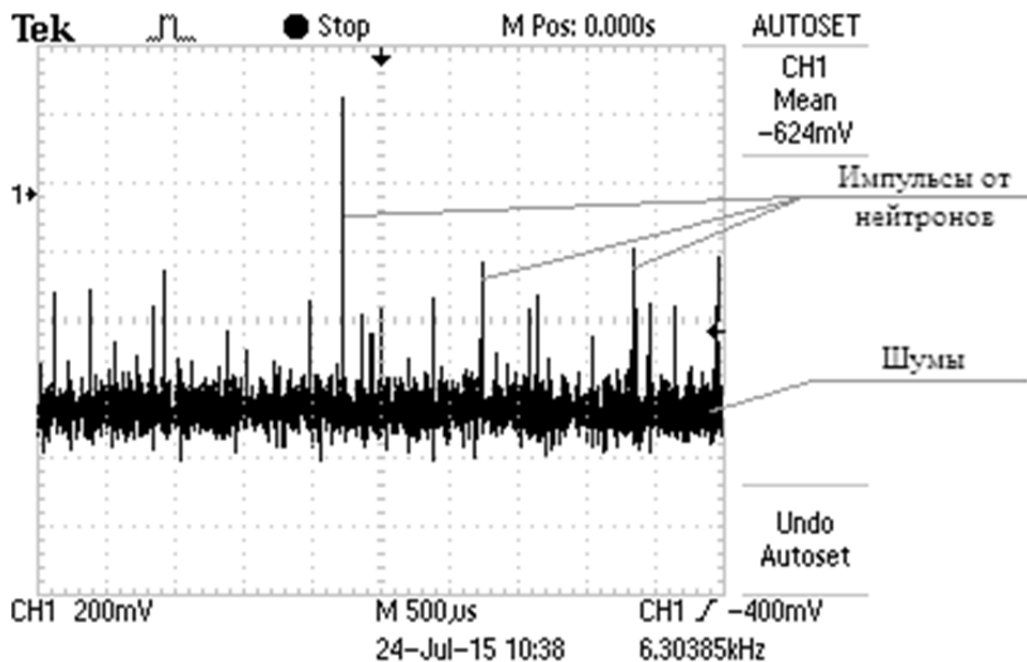


Рис. 2 Осциллограмма выходного сигнала на линейном выходе импульсного усилителя от нейтронов и шумов коронного разряда счетчиков СММ-11.

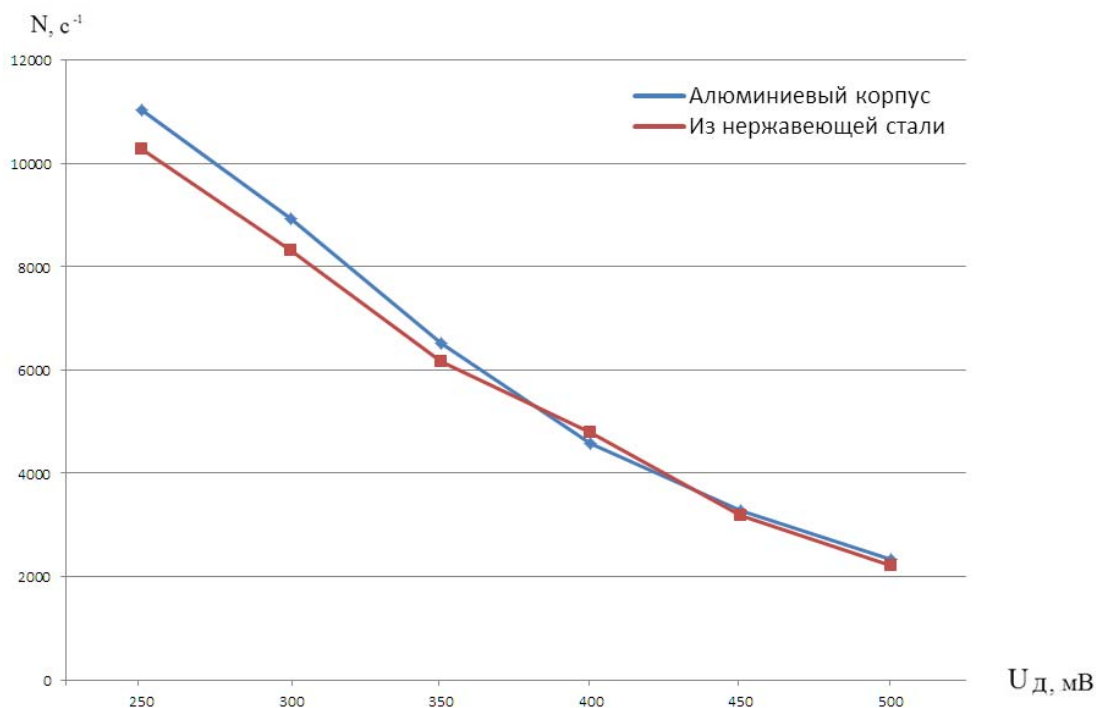


Рис. 3 Результаты измерений

Полученная разность чувствительности для блоков детектирования с разным материалом корпуса составляет не более 6% при пороге дискриминации выше уровня шумов, обеспечивается нужная, заданная проектными условиями, величина чувствительности блока детектирования;

Определение оптимального количества счетчиков.

Проведены лабораторные исследования по определению оптимального количества счетчиков нейтронов СНМ-11 при размещении в одном блоке. Испытания проводились поочередно с одним, двумя, тремя, четырьмя и пятью счетчиками, размещение которых показано на рисунке 4. Результаты лабораторных исследований представлены в виде графиков на рис. 5.

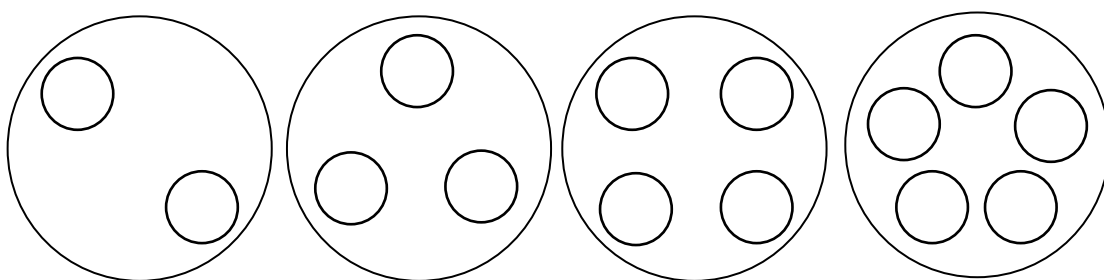


Рис. 4 Расположение счетчиков СНМ-11 в корпусе БД

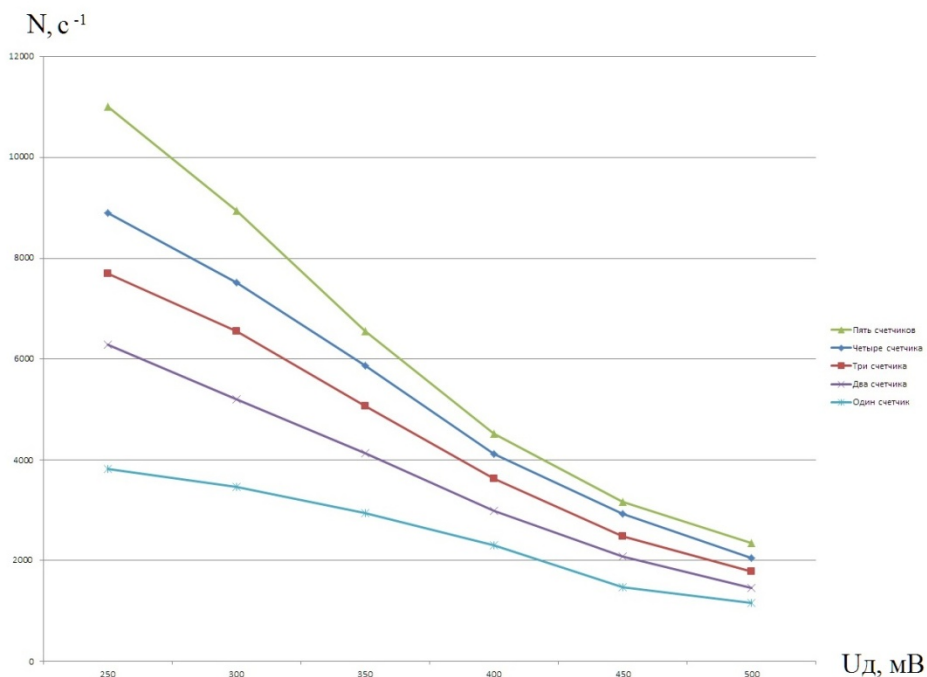


Рис. 5 Результаты измерений скорости счета

Uд – уровень дискриминации, мВ;
 N – скорость счета импульсов БД, с⁻¹,

Результаты эксперимента показали, что увеличение числа счетчиков в конструкции блока детектирования приводит к увеличению скорости счета, а, следовательно, и самой чувствительности.

Определим зависимость скорости счета от количества счетчиков в блоке детектирования. Для неизменяемого порога дискриминации равного 350 мВ, значения для каждого из измерений будут следующие (табл. 1):

Таблица 1

Значения скорости счета для каждого из измерений для порога дискриминации 350мВ

| Количество счетчиков | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------------------|------|------|------|------|------|
| N, с ⁻¹ | 2932 | 4134 | 5110 | 5868 | 6546 |

Взяв отношение каждой скорости счета к скорости счета одного счетчика получим:

$$\frac{N_5}{N_1} = \frac{6546}{2932} = 2.2326$$

$$\frac{N_4}{N_1} = \frac{5868}{2932} = 2.0014$$

$$\frac{N_3}{N_1} = \frac{5110}{2932} = 1.7428$$

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{4134}{2932} = 1.4010$$

Из приведенных расчетов видно следующее, что при количестве счетчиков n=2 скорость счета по отношению к скорости счета одного счетчика равно 1.4010, что приблизительно равно \sqrt{n} .

Так же и для других отношений:

$$n = 3, \quad \frac{N_3}{N_1} = 1.7428 \approx \sqrt{n};$$

$$n = 4, \quad \frac{N_4}{N_1} = 2.0014 \approx \sqrt{n};$$

$$n = 5, \quad \frac{N_5}{N_1} = 2.2326 \approx \sqrt{n};$$

Тогда зависимость скорости счета от количества счетчиков в блоке детектирования имеет следующий вид:

$$N_n = N_1 \cdot \sqrt{n} \quad (4)$$

где N_n – скорость счета n счетчиков;
 n – количество счетчиков в блоке детектирования;
 N_1 – скорость счета одного счетчика.

Так как скорость счета пропорциональна чувствительности для определенного уровня дискриминации, в нашем случае $U_d=350\text{мВ}$, и равна $S = N/\Phi$, то и для чувствительности справедлива зависимость:

$$S_n = S_1 \cdot \sqrt{n} \quad (5)$$

Из полученной зависимости можно теоретически рассчитать, как измениться скорость счета блока детектирования при увеличении счетчиков, например, до десяти.

Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Теоретические значения скорости счета для 6...10 счетчиков

| Количество счетчиков | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----------------------|------|------|------|------|------|
| $N, \text{с}^{-1}$ | 7182 | 7756 | 8292 | 8796 | 9272 |

Зависимость скорости счета от количества счетчиков представлены на рис.6

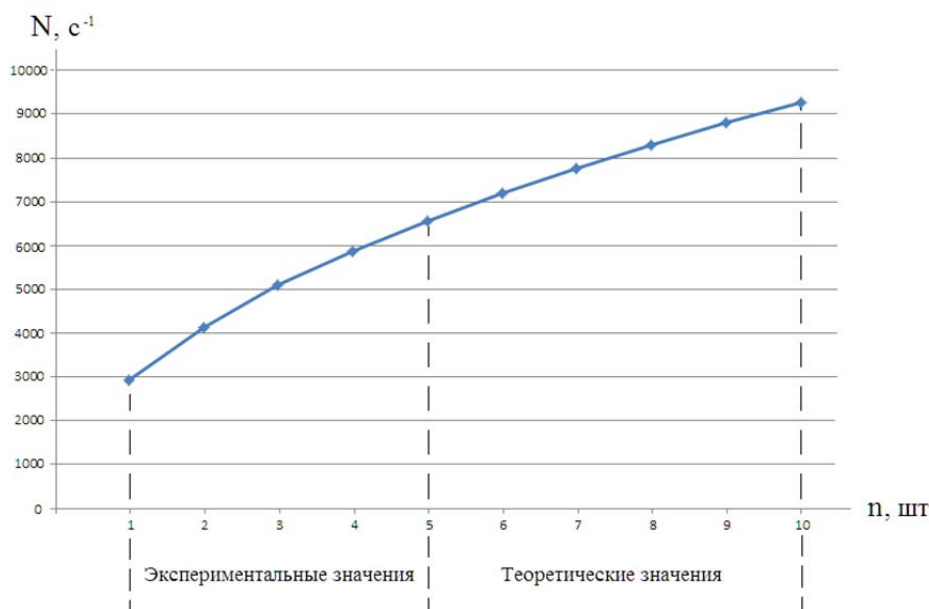


Рис. 6 Зависимость скорости счета от количества счетчиков в блоке детектирования при пороге дискриминации равном 350мВ

Заключение

Приведенные в данной работе расчеты и измерения позволяют сделать следующие выводы:

- Теоретически подтверждается возможность использования счетчиков СНМ-11 в конструкции разрабатываемого блока детектирования потока тепловых нейтронов в диапазоне источника на ВВЭР-1000;

- Экспериментально получена разность чувствительности для блоков детектирования с разным материалом корпуса. Разница по измерениям составляет не более 6% при пороге дискриминации выше уровня шумов, обеспечивается нужная, заданная проектными условиями, величина чувствительности блока детектирования;

- найдены оптимальное количество счетчиков в зависимости от диапазона контроля, линейности и чувствительности БД в соответствии с требованиями к аппаратуре

перегрузки топлива для ВВЭР-1000, а так же их расположение в корпусе БД в зависимости от конструктивных размеров каналов ИК.

Дальнейшие задачи исследований:

- Разработать конструкцию блока детектирования, которая будет содержать более пяти счетчиков, провести испытания на чувствительность;
- Произвести модернизацию счетчиков, исключить уязвимые элементы конструкции, произвести испытания и проанализировать результаты;
- Провести испытания на чувствительность к потоку тепловых нейтронов;
- Сравнить результаты измерений с результатами, приведенными в данной работе.

Авторы признательны Соколову И.В. за идею написания этой статьи.

Авторы благодарят Заикина А.А., Маленкина Д.А., Бахарева С.А. за предоставленные материалы и ценные советы и других сотрудников ССА за работы в подготовке экспериментов. Так же авторы благодарят Шикалова В.Ф. НИЦ «Курчатовский институт».

Литература

1. Borovik G.F. and other. The hardware complex of neutron flux monitoring system for control and protection of pressurized-water reactor. Nuclear energy t.54, rel.1, January 1983.
2. Gusarov A.M., Greckij L.Yu., Zhernov V.S., Kamyshan A.N., Konoplev N.P., Miroshnik Ju.M., Pronjakin A.V., Sokolov I.V., Jakushev A.G. Management system protective action of PWR. Nuclear measurement and information technology, № 1, 2004.
3. Sources of neutron radiation. JSC “V/O “Isotop”, <http://www.isotop.ru/>
4. The boron-lined proportional counters (CPNB), PHOTONIS
<https://www.photonis.com/en/product/boron-lined-proportional-counters>
5. Reference of label counter SNM-11. DGY P NPC “Detector”
6. Matveev V.V., Khazanov B.I. // Devices for measurement ionizing radiation. Moscow, Atomisdat Publ., 1967.
7. Mashkovich V.P., Kudryavceva A.V. // Directory. Protection against ionizing radiation. Moscow, Energoatomisdat Publ., 1995.
8. Skalny A.V., Rudakov I.A. // Bioelements and medicine. Moscow, Mir Publ., 2004.
9. The great Soviet encyclopedia. Moscow, Soviet encyclopedia Publ., 1926-1990.
10. Prokop'ev A.A., Gysev V.A. // Geometry. Full guide. Moscow, Makhaon Publ., 2006.
11. Anyr'ev V. I. // The reference design of mechanical engineering, Moscow, Mechanical Publ., 2006.
12. Technical task for neutron flux monitoring equipment AKNP-32R RUNK.501319.103 TU.

Research of the sensitivity and the estimation resource characteristics of the detection unit on the basis of corona counters SNM-11

Y.S. Koptelov, A.Y. Mironov, Y.B. Prokhorov, I.A. Schebatyrin

Joint stock company "SNIP-SYSTEMATOM"
Russia, Moscow, 123060, 5, Raspletina str., building 10

E-mail: USKoptelov@gmail.com

The paper presents the calculations for the burn up of the radiator counter SNM-11 in the thermal neutron flux at the rated power level of the PWR-1000. Estimated date for the complete burnout of the radiator, and also change the sensitivity of measurements at the urban nuclei of boron-10. The calculation and the choice of materials and component parts of the body, the optimal number of counters of the detecting unit are made.

Keywords: SCP, NFME, detection unit, the counter SNM 11, sensitivity, speed of burnout, resource.