

На правах рукописи



Коптелов Юрий Сергеевич

**РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНОЙ КОНСТРУКЦИИ
БЛОКА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ДИАПАЗОНА ИСТОЧНИКА АППАРАТУРЫ
КОНТРОЛЯ НЕЙТРОННОГО ПОТОКА ДЛЯ АЭС С ВВЭР**

Специальность: 05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в ЗАО «СНИИП-Систематом» и в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»)

Научный руководитель: *Шикалов Владимир Федорович*
доктор технических наук,
начальник отдела информационных технологий Курчатовского комплекса перспективной атомной энергетики
НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва.

**Официальные
оппоненты:** *Чебышов Сергей Борисович*
доктор технических наук, профессор,
Первый заместитель генерального директора по научной работе – Главный конструктор
АО «СНИИП», г. Москва;

Давиденко Николай Никифорович
доктор технических наук,
заместитель Генерального директора -
директор по технологическому развитию
АО «ВНИИАЭС».

Ведущая организация: Акционерное общество «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н.А. Доллежала» (АО «НИКИЭТ»), г. Москва.

Защита диссертации состоится « 28 » сентября 2021 г. в 14 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 520.009.07 на базе Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» по адресу: 123182, г. Москва, пл. Курчатова, д.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» и на сайте www.nrcki.ru

Автореферат разослан « » _____ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук,

Шкаровский Д. А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Одной из важнейших задач обеспечения безопасности реакторных установок (РУ) является контроль мощности и скорости ее изменения по плотности потока нейтронов. Контроль осуществляется во всех режимах эксплуатации атомной электростанции (АЭС) при помощи блоков детектирования (БД) на основе токовых ионизационных камер (ИК), камер деления и пропорциональных, коронных счетчиков нейтронов.

Контроль плотности потока тепловых нейтронов в диапазоне источника (на остановленном реакторе), при первом (физическом) пуске и пуске после перегрузки топлива обеспечивается с помощью счетчиков нейтронов с борным радиатором. Выбор данного типа детектора определяется высокой чувствительностью и большей амплитудой регистрируемого сигнала. Однако счетчики обладают низкой термической и радиационной стойкостью. Поэтому при применении на АЭС БД со счетчиками нейтронов неизменно требовалось перемещать от центра активной зоны РУ после достижения определенного уровня мощности.

И вследствие перемещения возникали эксплуатационные трудности, такие как, громоздкая и неудобная конструкция механизма в целом, перетирание и разрыв кабеля на барабане механизма перемещения и, как следствие, выход из строя БД, дополнительная радиационная нагрузка на персонал.

В связи с этим стала актуальной задача по разработке нового перемещаемого БД ДИ, применение которого исключит перечисленные эксплуатационные трудности.

Цели и задачи исследования

Целью данной работы явилось проведение научно исследовательских и опытно-конструкторских работ по определению возможности разработки термо- и радиационно-стойкой конструкции нового перемещаемого БД плотности потока тепловых нейтронов в диапазоне источника работы РУ, а также теоретических расчетов и экспериментальных исследований изменения чувствительности разработанного БД с учетом изменившихся условий эксплуатации. Для достижения поставленной цели должны быть решены следующие задачи:

- определить исходные данные для проектирования;
- определить конструктивные особенности и используемые материалы для составных частей БД;

- оценить возможность использования счетчиков в условиях, соответствующих работе реактора на мощности;
- определить зависимость чувствительности от количества счетчиков нейтронов в конструкции БД и определить их оптимальное количество;
- определить влияние изменившихся условий эксплуатации на чувствительности БД, таких как:
 - механические (сейсмостойкость, виброустойчивость, вибропрочность), климатические (тепло-, холодо-устойчивость, холодо-, влагопрочность,);
 - устойчивость к проникновению твердых предметов и воды при эксплуатации;
 - устойчивость к электромагнитному излучению;
 - устойчивость к гамма-излучению;
 - устойчивость к воздействию внешних факторов в аварийных условиях «малая, большая течь», а так же прочность и герметичность;
- провести ресурсные испытания разработанного неперемещаемого БД и оценить влияние флюенса нейтронов на чувствительность;
- аттестовать в качестве средства измерения (СИ) и включить в госреестр СИ.

Научная новизна работы

- впервые разработана термо- и радиационно-стойкая конструкция нового неперемещаемого БД плотности потока тепловых нейтронов в диапазоне источника работы РУ;
- определена зависимость изменения чувствительности при изменившихся условиях эксплуатации;
- впервые проведены ресурсные испытания неперемещаемого БД на работающей АЭС;
- определено изменение чувствительности под влиянием флюенса нейтронов в течение топливной кампании на АЭС;
- впервые разработаны методики для проведения метрологических испытаний БД в лабораторных условиях и на АЭС.

Практическая значимость работы

- разработана конструкция, которая позволяет обеспечивать безопасность при эксплуатации РУ на остановленном реакторе, при пуске, перезарулке и пуске после перезарулки топлива без перемещения БД, что уменьшает радиационную нагрузку на персонал при эксплуатации;
- получены данные по изменению чувствительности БД и влиянию воздействующих факторов при изменившихся условиях эксплуатации;

- БД внедрен в промышленную эксплуатацию и успешно работает в составе АКНП нового поколения на энергоблоке №2 Калининской АЭС.

Достоверности полученных научных результатов

Полученные в диссертационной работе данные, а именно чувствительность неперемещаемого БД, были верифицированы измерением чувствительности датчика от эталонного источника нейтронов в лабораторных условиях. А так же сравнением с показаниями аналогичных, калиброванных датчиков на основе счетчиков СМ-11 системы контроля перегрузки топлива на АЭС до начала топливной кампании и после ее завершения.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту

- разработка и конструкция нового неперемещаемого БД плотности потока тепловых нейтронов в диапазоне источника работы РУ, отличающаяся повышенной термо- и радиационной стойкостью;
 - зависимость чувствительности БД от количества счетчиков, а также ее изменение под действием внешних воздействующих факторов при изменившихся условиях эксплуатации;
 - база данных результатов ресурсных испытаний датчика и влияния флюенса нейтронов на чувствительность БД;
 - база данных результатов исследований при пуске Калининской АЭС блок 2, при котором использовалась АКНП с новым неперемещаемым БД.

Личный вклад

- автор лично провел теоретические расчеты по выбору материалов и конструктивных элементов неперемещаемого БД;
- автор принимал активное участие в разработке опытной конструкции БД, а так же в разработке и изготовлении серийной конструкции датчика;
- автором лично определена зависимость чувствительности БД от количества счетчиков в конструкции БД;
- автор принимал непосредственное участие в определении зависимости чувствительности БД от количества счетчиков в конструкции, а также ее изменения под действием внешних воздействующих факторов и, что особенно важно, флюенса нейтронов;
- автор принимал непосредственное и активное участие в экспериментальных исследованиях, испытаниях, выборе методов исследования и анализе полученных результатов;

- автор принимал участие в разработке методик для проведения метрологических испытаний БД в лабораторных условиях и на действующей АЭС.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы из 81 наименования, содержит 107 страниц, 30 таблиц и 40 рисунков.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 14 научных междисциплинарных и международных конференциях.

Публикации

По материалам диссертации в различных изданиях опубликованы 2 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель работы и решаемые задачи, научная новизна и практическая значимость, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «БД как составная часть аппаратуры контроля нейтронно-физических параметров на АЭС» приведено описание, назначение и конструктивные особенности БД плотности потока тепловых нейтронов.

БД являются одной из основных составляющих АКНП, которые используются совместно с другим оборудованием. БД АКНП располагаются за корпусом реактора в каналах биологической защиты. В зависимости от назначения БД размещаются в связке с другими блоками детектирования, что бы максимально контролировать нужные параметры, либо поодиночке. Блоки детектирования диапазонов ПД, РД1, РД2, благодаря своей конструкции (материалы конструкции и кабеля линии связи), постоянно находятся в каналах биологической защиты реактора, БД ДИ движутся механизмами перемещения с ручным управлением и устройством контроля положения блоков детектирования. Система управления механизмами перемещения выводит блоки детектирования из зоны значительных потоков нейтронов при выводе реактора на мощность и обеспечивает их аварийный ввод в рабочее положение при прохождении сигнала аварийной защиты или снижении мощности реактора.

Однако вследствие перемещения возникали эксплуатационные трудности, такие как, громоздкая и неудобная конструкция механизма в целом, перетирание и разрыв кабеля на барабане механизма перемещения и как следствие выход из строя БД, дополнительная радиационная нагрузка на персонал.

В связи с этим требуется проведение исследовательских расчётных и экспериментальных работ, проектно-конструкторской разработки и испытаний с целью доведения до соответствия изменившимся условиям эксплуатации и повышения технических и эксплуатационных характеристик, а именно изменение конструкции перемещаемого БД.

Проведенный анализ конструкций БД ДИ показал, что на сегодняшний момент не существует перемещаемых средств контроля плотности потока тепловых нейтронов на остановленном реакторе. Поэтому ЗАО «СНИИП-Систематом», учитывая 25-летний опыт построения иницирующих систем безопасности АЭС, приняло решение разработать БД диапазона источника, который будет соответствовать изменившимся условиям эксплуатации. Данный БД обеспечит наблюдаемость размножающейся среды в активной зоне реактора до и во время пуска реактора, включая глубокую подкритичность.

Во второй главе «Конструктивные особенности нового неперемещаемого БД» определены основные параметры для проектирования и приведено описание неперемещаемой конструкции БД с учетом изменившихся условий эксплуатации.

Для начала была определена возможность использования счетчиков нейтронов в условиях, соответствующих работе реактора на мощности. Так же при обосновании концепции оставления подвески со счётчиками в зоне действия потоков нейтронов высокого уровня необходимо решить несколько технических проблем. Прежде всего, необходимо оценить и учесть потерю чувствительности вследствие выгорания материала радиатора.

Для этого была выполнена инженерная оценка скорости выгорания ядер бора-10 и определена ожидаемая величина потери чувствительности при бесполезном нахождении счётчика в рабочем положении и выключенном высоком напряжении. Расчеты показали, что за год выгорит $\approx 0,5\%$ ядер бора-10, а следовательно, чувствительность ухудшится соизмеримо.

Данные расчеты позволяют применить счетчик СНМ-11 в конструкции нового БД в новых условиях эксплуатации.

Помимо возможности использования был проведен анализ конструкции счетчиков, который показал, что в базовом состоянии (с завода изготовителя) они не выдерживают влияния изменившихся условий эксплуатации. Для соответствия требуемым параметрам счетчик был доработан.

Самым уязвимым местом являются торцевые заглушки-изоляторы 1 (рисунок 2.1). Поэтому материал заглушек также был заменен на коррозионностойкую сталь 12Х18Н10Т. Корпус счетчика, катод, отделен от нити, анода, керамическими изоляторами 2. Сравнение конструкций приведено на рисунках 2.1, 2.2.



Рисунок 2.1 – Общий вид счетчика СНМ-11 заводского исполнения



Рисунок 2.2 – Общий вид счетчика нейтронов термо- и радиационно-стойкой модификации

Далее была проведена оценка кабельной линии связи. Кабель старого БД - на основе полимерного кабеля КАГЭ-НФ ТУ16.К71-317-2002. Кабель обладает низкой радиационной и температурной стойкостью, поэтому он был заменен на огнестойкие, терморезистентные и не распространяющие горение кабели типа КНММС ТУ 16.К71-244-95.

Кабель КНММС (рисунок 2.3) имеет одну однопроволочную токопроводящую жилу 1 из нержавеющей стали, плакированную медью, заключенную в две металлические оболочки, изолированные друг от друга и от токопроводящей жилы периклазом электротехническим 2. Внутренний слой внутренней оболочки 3 изготовлен из меди, внешний слой внутренней оболочки — из магнетомягкого материала. Наружная оболочка кабеля 4 изготовлена из нержавеющей стали.

Кабель предназначен для длительной эксплуатации в воздушной среде при температуре от минус 60° С до плюс 800° С при напряжении постоянного или переменного тока до 500В частотой до 1кГц.

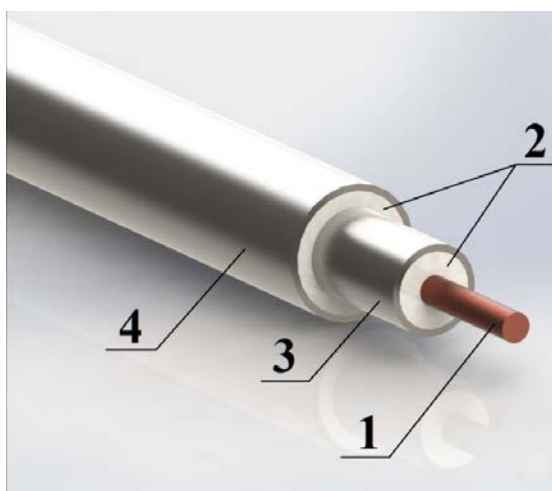


Рисунок 2.3 – Условное изображение кабеля КНММС

Так же важным параметром для разрабатываемого БД 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. Также 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 выбрана коррозионностойкая сталь 12Х18Н10Т, которая применена для всех деталей, входящих в БД.

Так как материал корпуса был изменен, необходимо определить оптимальную толщину стенки корпуса для разрабатываемого БД. При расчете было учтено, что толщина, с одной стороны, должна быть минимальной, что бы корпус не препятствовал прохождению нейтронов, а с другой стороны, достаточной, что бы выдерживать новые ВФ. Произведя расчеты, толщина стенки была принята равной 0,8 мм.

На основе проведенных расчетов был разработан опытный БД в разборном варианте. Это позволило во время проведения испытаний менять число счетчиков, их положение, использовать алюминиевый или коррозионностойкий материал для корпуса. Такой вариант исполнения предоставил возможность провести комплексный анализ влияния шумовых характеристик, влияния взаимного экранирования счетчиков, определения зависимости чувствительности блоков от числа счетчиков.

Важной задачей при разработке БД является сохранение чувствительности БД старой конструкции как минимум, а как максимум – ее увеличение. Поэтому было определено, исходя из конструктивных возможностей канала ИК РУ АЭС, оптимальное количество счетчиков, которое обеспечит максимальную чувствительность.

Для определения оптимального количества счетчиков были проведены экспериментальные исследования. Исследования проводились на установке УРН-1 поочередно с одним, двумя, тремя, четырьмя, пятью и семью счетчиками.

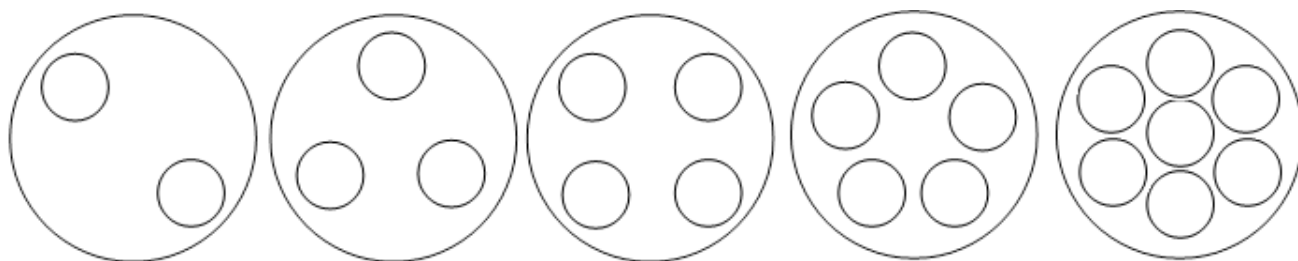


Рисунок 2.4 – Расположение счетчиков нейтронов в корпусе БД

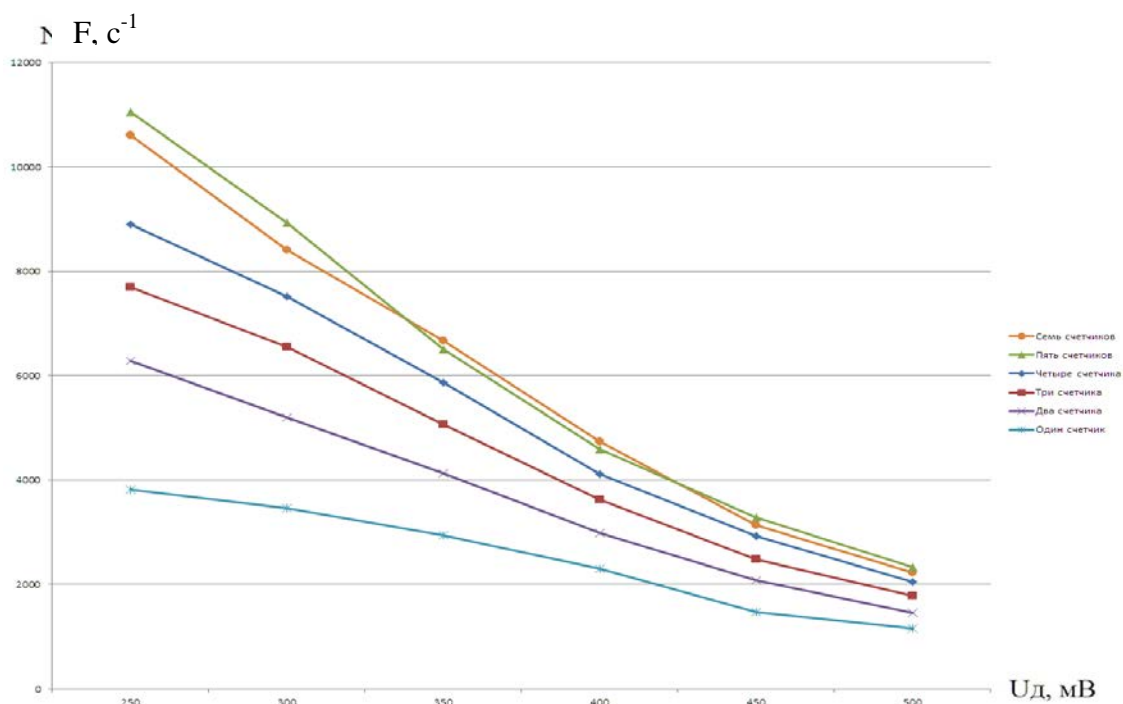


Рисунок 2.5 – Экспериментальные результаты исследований

U_d – уровень дискриминации, мВ;

F – 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. При этом увеличение количества счетчиков в конструкции БД до семи приводит к незначительному увеличению чувствительности, а на уровнях дискриминации от 350 мВ до 450 мВ к незначительному уменьшению.

Незначительное изменение чувствительности при количестве счетчиков равном 7 связано с эффектом взаимного экранирования. Для уменьшения взаимного экранирования счетчики нужно разнести на максимальное расстояние друг от друга в пределах внутренней поверхности кожуха БД.

Для определения взаимного расположения счетчиков была проведена расчетная оценка изменения чувствительности БД, исходя из количества взаимодействий нейтронов с атомами бора-10 на единицу поверхности. Расчеты проводятся без учета влияния факторов, оказывающих влияние на чувствительность (шумы, качество бора-10 в счетчике и поглощение потока тепловых нейтронов). Расчет проведен исходя из пространственного расположения счетчиков внутри объема БД.

Таблица 2.1 – Изменение чувствительности с учетом пространственного расположения счетчиков внутри объема БД.

Количество счетчиков	Число взаимодействий без учета экранирования, 1/с	Число максимальных взаимодействий с учетом экранирования, 1/с	Число реальных взаимодействий с учетом экранирования, 1/с
1	$2,58 \cdot 10^{12}$	$2,58 \cdot 10^{12}$	$1,32 \cdot 10^{12}$
2	$5,16 \cdot 10^{12}$	$5,16 \cdot 10^{12}$	$2,64 \cdot 10^{12}$
3	$7,74 \cdot 10^{12}$	$6,6 \cdot 10^{12}$	$3,96 \cdot 10^{12}$
4	$10,32 \cdot 10^{12}$	$7,92 \cdot 10^{12}$	$4,62 \cdot 10^{12}$
5	$12,9 \cdot 10^{12}$	$9,24 \cdot 10^{12}$	$5,28 \cdot 10^{12}$
7	$18,6 \cdot 10^{12}$	$10,56 \cdot 10^{12}$	$5,28 \cdot 10^{12}$
5 разнесенных	$12,9 \cdot 10^{12}$	$12,9 \cdot 10^{12}$	$5,94 \cdot 10^{12}$

Результаты расчетов показали, что, начиная с трех счетчиков в конструкции БД при их расположении вплотную, проявляется эффект взаимного экранирования, который влияет на чувствительность БД. Поэтому оптимальное количество счетчиков, которые обеспечат максимальное количество взаимодействий потока тепловых нейтронов с атомами бора-10, а следовательно, и оптимальную чувствительность, было выбрано равным пяти при разнесенном расположении.

Таким образом, экспериментальные исследования и теоретические расчеты позволяют сделать вывод об оптимальном количестве счетчиков в конструкции БД: это количество равно пяти.

Так же вклад в полезный сигнал вносит и шумовая составляющая.

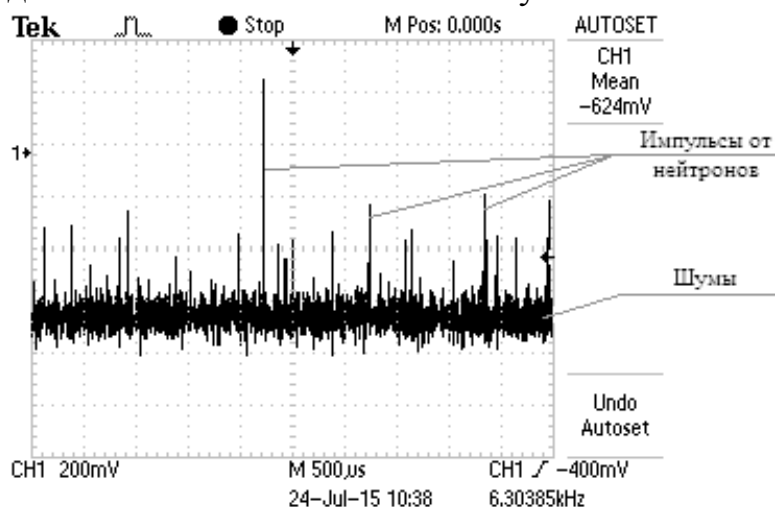


Рисунок 2.6 – Оциллограмма выходного сигнала на линейном выходе импульсного усилителя от нейтронов и шумов коронного разряда счетчиков нейтронов.

Из приведенной на рисунке 2.6 осциллограммы выходного сигнала на линейном выходе импульсного усилителя счетчиков нейтронов выходной сигнал складывается из импульсов собственных шумов счетчика (шумы коронного разряда) и импульсов от взаимодействия нейтронов с атомами бора-10. И для того, чтобы получаемая информация была достоверной, необходимо исключить шумовую составляющую. Это достигается установлением порога дискриминации выше уровня шумов.

С учетом дополнительных исследований и расчетов был разработан второй блок детектирования в неразборном варианте с оптимальным числом счетчиков, которые обеспечат максимальную чувствительность датчика при заданных температурных и радиационных параметрах.

Неперемещаемый БД разработан на основе радиационно-стойкой модификации коронных счетчиков нейтронов и основан на физических принципах и основных конструктивно-технологических решениях по аналогии со счетчиками нейтронов СНМ-11 ОД0.339.070 ТУ.

Чувствительность БД к тепловым нейтронам в диапазоне энергий 0,025 - 0,5 эВ составляет $4 \pm 1 \text{ см}^2$ (число импульсов за 1 с под воздействием потока нейтронов с плотностью $1,0 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$).

Конструктивно блок состоит из корпуса 1, выполненного в виде тонкостенного цилиндра из коррозионностойкой стали, внутри которого расположены счетчики нейтронов. Корпус отделен от счетчиков изоляторами, что исключает влияние внешних факторов на сигнал. К одной из торцевых поверхностей подсоединяются нагревостойкие кабели типа КНММС 2. Датчик соединяется с блоком преобразования 3 с помощью радиочастотных соединителей 4 типа СР (рисунок 2.7).

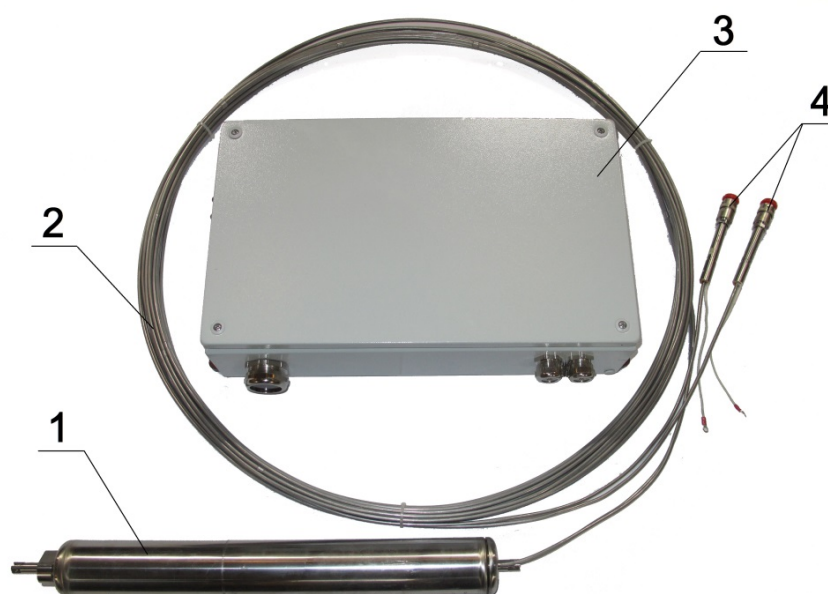


Рисунок 2.7 – Общий вид УД

Конструкция БД неразборная и герметичная, термо- и радиационно-стойкая. А следовательно, отсутствует необходимость в перемещении БД в канале ИК в процессе эксплуатации (вверх в рабочее положение при пуске РУ или перед перегрузкой топлива и, обратно, вниз в положение с минимальной плотностью потока нейтронов после пуска или завершения перегрузки топлива).

В третьей главе «Лабораторные испытания. Влияние воздействующих факторов» приведено описание и представлены результаты всех видов испытаний, проведенных для подтверждения соответствия изменившимся условиям эксплуатации.

Испытания показали, что разработанный БД сохраняет работоспособность и соответствует всем требованиям, нормам и правилам обеспечения безопасности при эксплуатации АЭС.

БД предназначен для регистрации медленных нейтронов в диапазоне энергий от 0,025 до 100 эВ в коронном режиме и основан на физических принципах и основных конструктивно-технологических решениях по аналогии со счетчиками нейтронов СНМ-11 ОД0.339.070 ТУ.

Чувствительность БД к медленным нейтронам в диапазоне энергий от 0,025 до 100 эВ составляет $4,0 \pm 1,0 \text{ см}^2$ (число импульсов за 1 с под воздействием потока нейтронов с плотностью $1,0 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$).

Собственный фон БД не превышает $0,05 \text{ имп.} \cdot \text{с}^{-1}$.

БД сохраняет свою работоспособность после пребывания под воздействием потока нейтронов с плотностью $4,0 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ и гамма-излучения с интенсивностью $1,0 \cdot 10^3 \text{ Гр} \cdot \text{ч}^{-1}$ в течение 10 лет.

По назначению и влиянию на безопасность АЭС БД соответствует требованиям НП-001-15 (ОПБ-88/15) «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций», относится к классу безопасности 2 и имеет классификационное обозначение 2НУ.

БД обеспечивает контроль плотности потока тепловых нейтронов в каналах ионизационных камер в диапазоне от $2,0 \cdot 10^{-2}$ до $2,0 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ при мощности поглощенной в воздухе дозы фонового гамма-излучения в месте размещения блока детектирования не более $1 \text{ Гр} \cdot \text{ч}^{-1}$ ($1,0 \cdot 10^2 \text{ Р} \cdot \text{ч}^{-1}$).

Допускаемая основная относительная погрешность БД в диапазоне потока тепловых нейтронов от $5 \cdot 10^{-2}$ до $2,0 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ не превышает 25 % при доверительной вероятности 0,95.

Изменение чувствительности и собственного фона БД под воздействием гамма-излучения интенсивностью до $15 \text{ Гр} \cdot \text{ч}^{-1}$ не превышает $\pm 5\%$.

Дополнительная погрешность БД при увеличении длины кабельной линии связи от блока детектирования до блока преобразования на 120 м кабелем КАГЭ-НФ ТУ16.К71-317-2002 не превышает половины основной погрешности.

Режим работы БД непрерывный. Нестабильность не превышает $\pm 5\%$ за 24 ч непрерывной работы.

БД герметичен. Степень защиты блока детектирования от проникновения твердых тел и воздействия воды соответствует коду IP57 по ГОСТ 14254.

БД удовлетворяет требованиям пожаробезопасности по ГОСТ 12.1.004. Вероятность возникновения пожара не превышает $1 \cdot 10^{-6}$ в год.

БД работоспособен при воздействии температуры окружающей среды от минус 50 до + 155 °С.

БД устойчив в течение 24 ч в условиях аварии при температуре окружающей среды до 250 °С.

БД устойчив в течение 24 ч в условиях избыточного давления 0,46 МПа в месте расположения БДПН.

БД допускает эксплуатацию в атмосфере типа IV по ГОСТ 15150.

БД соответствует климатическому исполнению ТВ и М, категории размещения 4 по ГОСТ 15150 с расширением рабочей температуры от минус 10 до + 60 °С.

БД относится к I категории сейсмостойкости по НП-031 (ПНАЭ Г-5-006) и по месту установки на объекте соответствует группе А по ГОСТ 29075. По функциональному назначению блок детектирования выполняет свои функции и сохраняет свои параметры в пределах установленных значений во время и после сейсмических воздействий при нагрузках МРЗ в соответствии с требованиями ГОСТ 17516.1 на высотной отметке более 30 м, при воздействии гармонических вибраций в горизонтальном и вертикальном направлениях по осям X, Y, Z с фиксированными частотами.

Блок детектирования БД выдерживает удары одиночного действия, по три удара в трех взаимно перпендикулярных направлениях с пиковым ударным ускорением $30 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ (3 g) при длительности действия ударного ускорения от 2 до 20 мс.

БД устойчив к механическим воздействиям, возникающим от удара самолета, падающего на АЭС, и воздушной ударной волны в соответствии с требованиями ГОСТ 29075.

БД в транспортной упаковке устойчив к воздействию вибрации по группе М21 ГОСТ 17516.1 и допускает перевозку автомобильным, железнодорожным, водным и авиационным (в герметизированных отсеках) транспортом при температуре окружающего воздуха от минус 20 до + 50 °С.

БД в упаковке для транспортирования устойчив при воздействии температур от минус 50 до +50 °С.

БД в упаковке для транспортирования устойчив при воздействии повышенной влажности воздуха до 100 % при температуре +40 °С.

БД устойчив к воздействию атмосферного давления от 84 до 106,7 кПа.

Материалы БД устойчивы к воздействию дезактивирующего раствора едкого натра NaOH концентрацией 30 – 40 г/л и перманганата калия KMnO_4 концентрацией 2 – 5 г/л, либо раствора щавелевой кислоты $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ концентрацией 10 – 30 г/л при температуре раствора до 100 °С, а также устойчивы к воздействию раствора едкого натра NaOH концентрацией 50 – 60 г/л и перманганата калия KMnO_4 концентрацией 5 – 10 г/л, либо раствора щавелевой кислоты $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ концентрацией 20 – 40 г/л при температуре раствора 20 °С.

БД по степени устойчивости к электромагнитным помехам относится к IV группе исполнения для жесткой электромагнитной обстановки и критерию качества функционирования А по ГОСТ 32137 и устойчив к помехам следующих видов:

- электростатических разрядов по ГОСТ 30804.4.2;
- радиочастотных электромагнитных полей по ГОСТ 30804.4.3;
- магнитных полей промышленной частоты по ГОСТ Р 50648;
- импульсных магнитных полей по ГОСТ Р;
- токов кратковременных синусоидальных помех частотой 50 Гц в цепях защитного и сигнального заземления по ГОСТ 32137;
- токов микросекундных импульсных помех в цепях защитного и сигнального заземления по ГОСТ 32137;
- наносекундных импульсных помех по ГОСТ 30804.4.4;
- микросекундных импульсных помех большой энергии в цепи постоянного тока по ГОСТ Р 51317.4.5;
- напряжений, наведенных радиочастотным электромагнитным полем в кабелях питания и связи в полосе частот 0,15 – 80 МГц по ГОСТ Р 51317.4.6;
- затухающих колебательных магнитных полей по ГОСТ Р 50652.

БД удовлетворяет нормам эмиссии промышленных радиопомех, регламентируемых ГОСТ 30 805.22.

БД относится к оборудованию длительного пользования. Нарботка на отказ не менее $1,2 \cdot 10^4$ ч. Назначенный срок службы - 10 лет.

Масса БД — от 7,0 до 8,5 кг в зависимости от длины кабельной линии связи.

В четвертой главе «Реакторные испытания. Оценка влияния флюенса нейтронов на характеристики БД» приведены результаты испытаний БД ДИ в натуральных условиях на действующей АЭС.

Для проведения данной работы была разработана программа на основании «Технического решения о временной установке блока детектирования в канал ионизационной камеры реакторной установки энергоблока № 4 Нововоронежской АЭС» №90/2016-4-ЦТАИ в период 42-ой топливной кампании. Разработанная программа включала в себя проведение работ в два этапа. Каждый из этапов выполнялся при достижении соответствующих условий по состоянию оборудования и технологических параметров БД.

Выполнение первого этапа программы проводилось после окончания перегрузки топлива реакторной установки, вывода из работы системы контроля перегрузки топлива (СКП) и до начала разогрева первого контура. Измерения проводились варьированием уровня дискриминации U_d от значений, при которых вклад импульсов от шумов максимален, до значений, при которых шумовая характеристика не влияет на чувствительность БД.

Результаты измерений первого этапа представлены на рисунке 4.1.

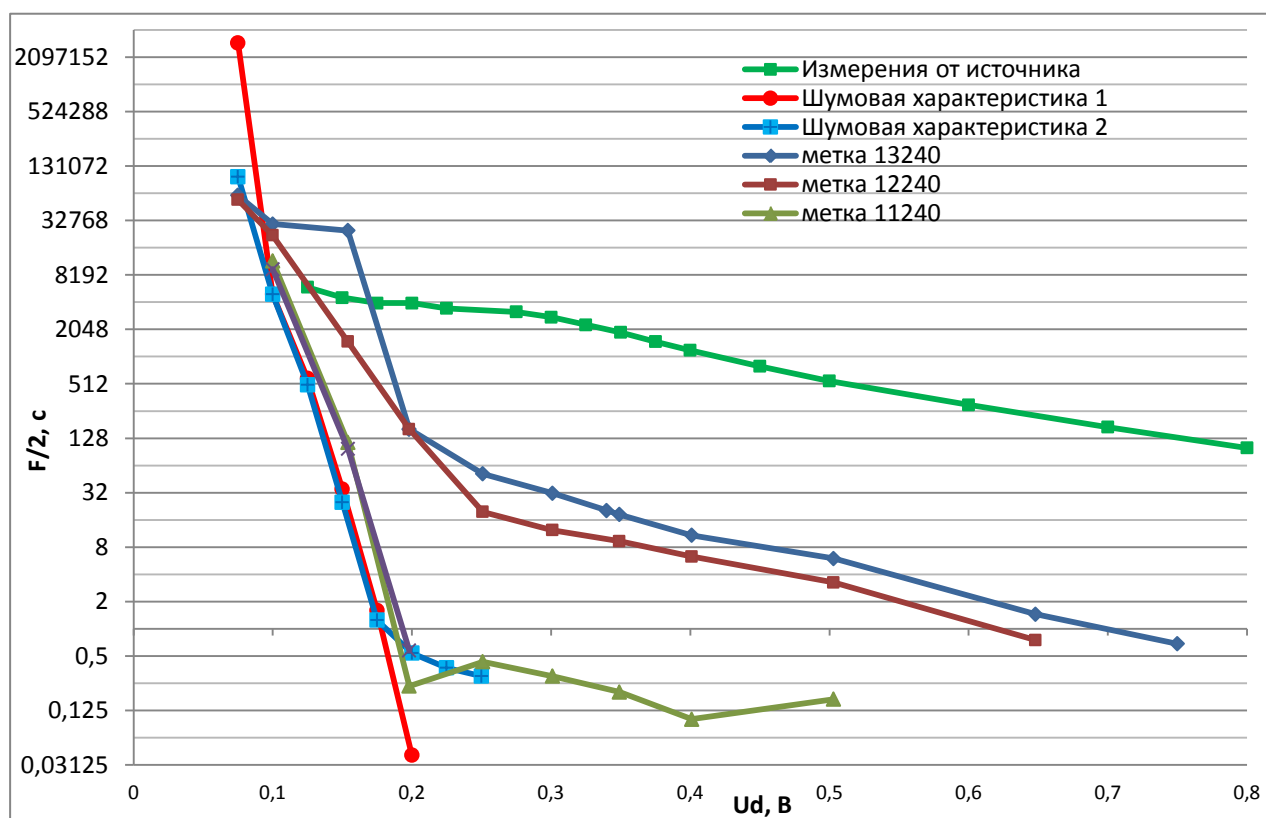


Рисунок 4.1 – Результаты измерений на НВ АЭС этап 1, $N_{ном}=0$

Проведенные измерения показали, что чем дальше БД перемещался от центра активной зоны, тем меньше становятся его показания. На остановленном реакторе с загруженным топливом до начала пуска, т.е. в диапазоне источника,

БД работает исправно и регистрирует импульсы от нейтронов. Исправность работы БД подтверждается схожим наклоном дискриминационных характеристик, полученных в лабораторных условиях и на Нововоронежской АЭС. Также показания соответствуют показаниям штатной системы СКП при чувствительности $S=6 \text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ (нейтр. $\cdot(\text{см}^2\cdot\text{с})^{-1}$), при этом частота по 5 штатным каналам СКП составляла $F=30\div 38$ Гц, а показания БД $F=32$ Гц.

Выполнение второго этапа программы проводилось по окончании нейтронно-физических измерений и пуска реактора.

Второй этап включает в себя периодические измерения дискриминационных характеристик БД во время работы реактора, и разбит на 4 подэтапа.

Измерения первого подэтапа проводились при $N_{ном}=95\%$.

Второго и третьего при $N_{ном}=100\%$.

Четвертого при $N_{ном}=10^{-9}\%$.

Измерения на каждом подэтапе проводились по той же методике, что и измерения первого этапа.

Результаты измерений при $N_{ном}=100\%$ представлены на рисунке 4.2.

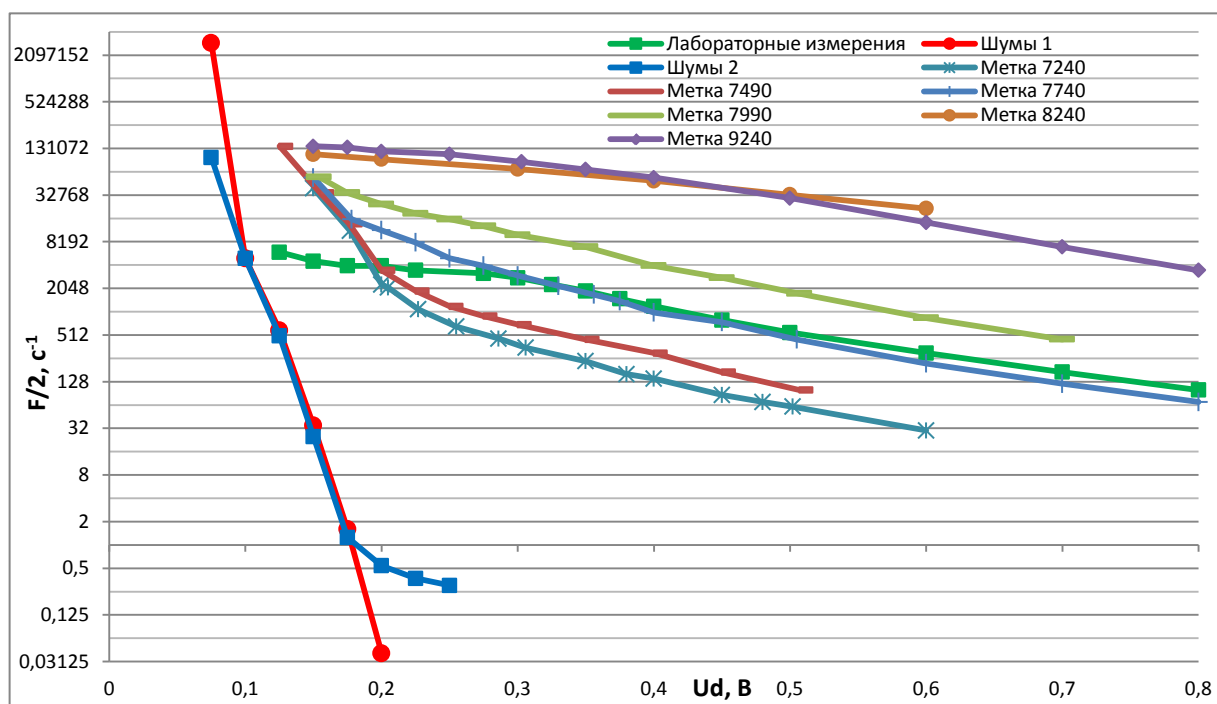


Рисунок 4.2 – Результаты измерений на НВ АЭС этап 2 измерение 2, $N_{ном}=100\%$

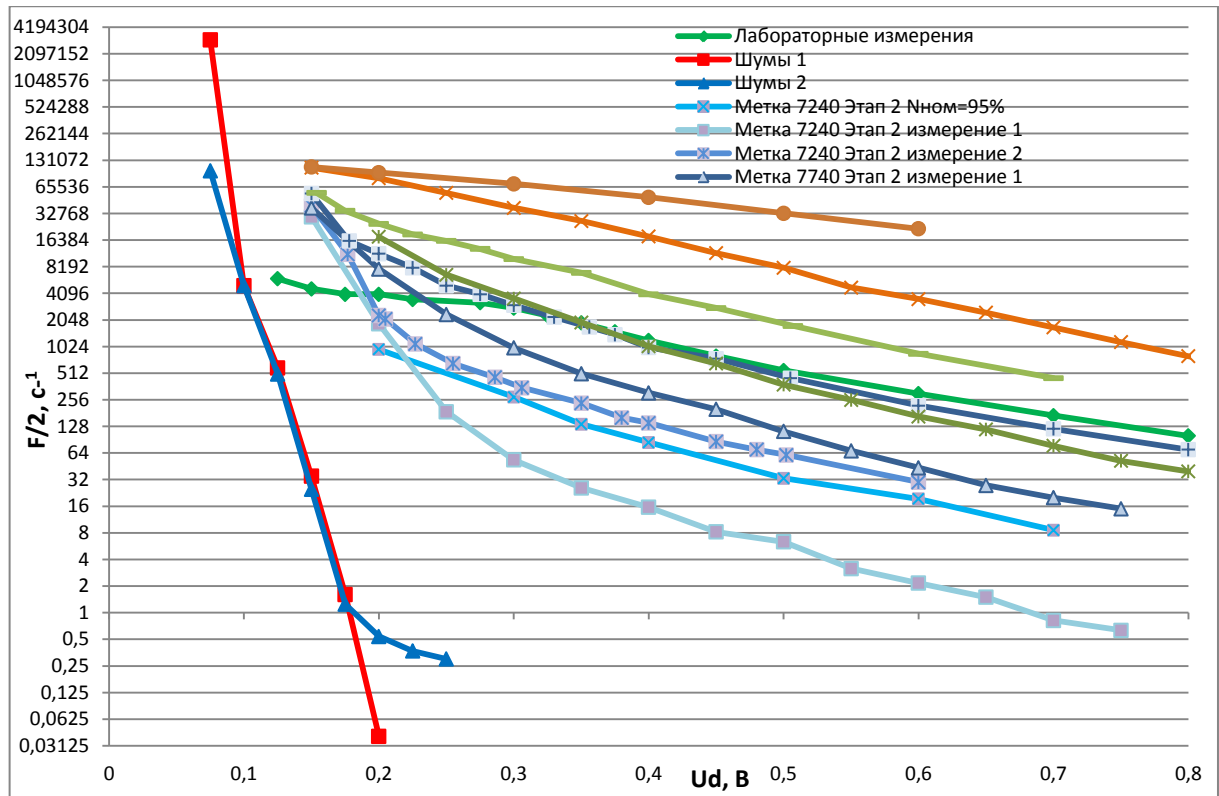


Рисунок 4.3 – Сравнение чувствительности БД, этап 1, 2

Измерения второго этапа показали, что БД после нахождения в канале ИК работающего реактора на протяжении 12 месяцев сохраняет свою работоспособность. Датчик находится в исправном состоянии, т.к. наклон дискриминационных кривых на работающем реакторе при $N_{ном}=95\%$ и $N_{ном}=100\%$ сопоставим с наклоном дискриминационных кривых, снятых при $N_{ном}=10^{-9}$ и в лабораторных условиях.

Для оценки изменения чувствительности построим графики зависимостей скорости счета до начала топливной компании и по ее окончании, значения приведены на рисунке 4.4 для положения БД напротив активной зоны.

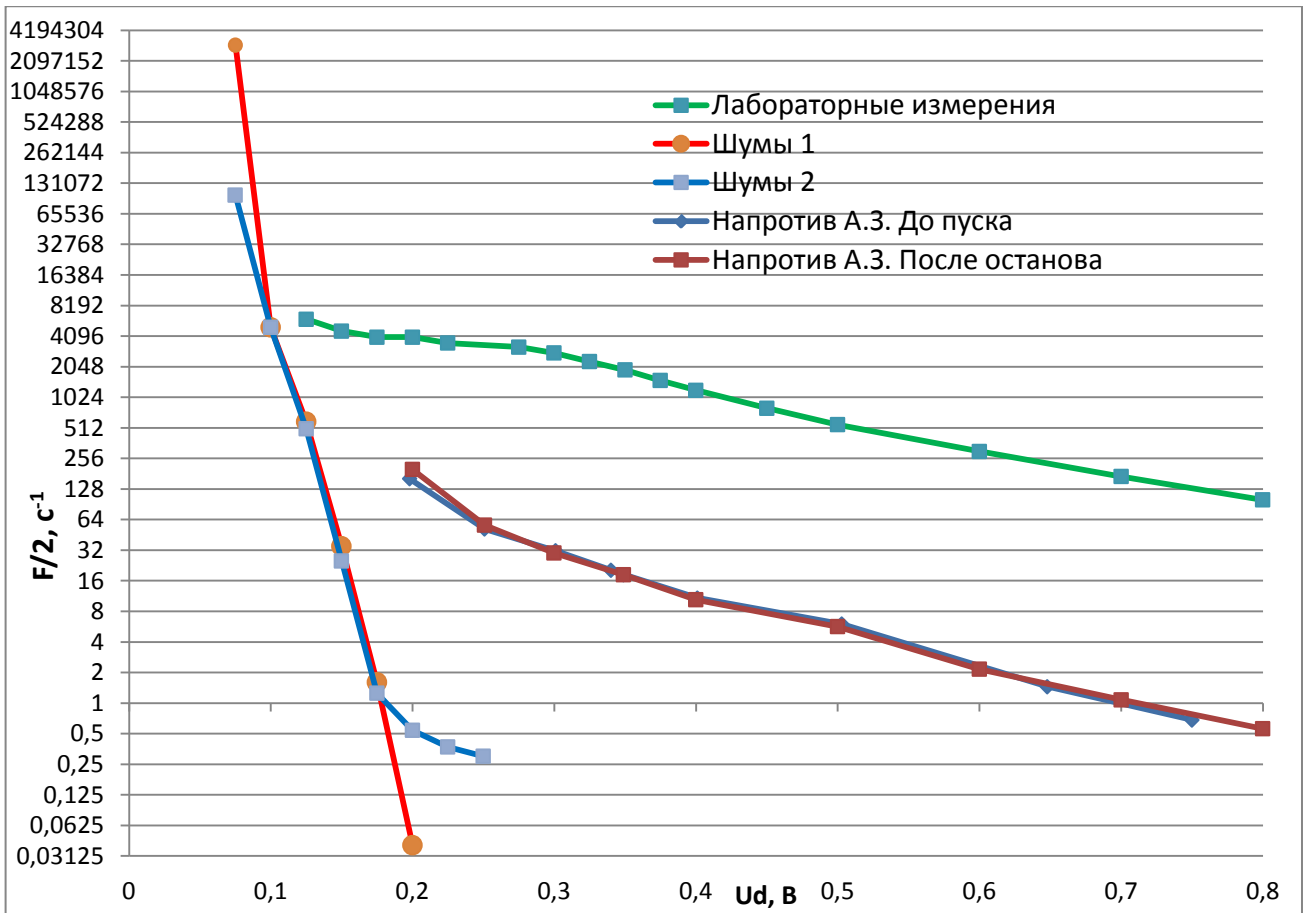


Рисунок 4.4 – Сравнение показаний БД до пуска и после останова

При рабочем пороге дискриминации $U_d=350\text{ мВ}$ значение скорости счета до пуска РУ после перегрузки составляет $F=18,4\text{ с}^{-1}$. После останова - $F=18,3\text{ с}^{-1}$. Таким образом, скорость счета БД с чувствительностью $S=4\pm 2\text{ см}^2$ до пуска и после пуска отличается на 0,54%.

Параметры дискриминационных характеристик, наклон и их значения, полученные на разных временных этапах испытаний, до пуска РУ и после останова, совпадают. Счетная характеристика испытываемого измерительного канала совпадает с показаниями штатной системы СКП, что подтверждает сохранение чувствительности во время проведения испытания.

В пятой главе «Системные решения для АКНП» приведены возможные решения по увеличению чувствительности БД для контроля размножающейся среды при пуске реактора и при перегрузке топлива.

Увеличить чувствительность можно за счет увеличения детекторов в конструкции БД. Но, как показали расчеты и исследования в данной работе, это количество определяется размерами канала ИК и возникающим при плотном размещении детекторов эффектом взаимного экранирования. Вариант реально существенного увеличения чувствительности для режимов и состояний, в которых это требуется, заключается в использовании суммарного сигнала

одинокных измерительных каналов.

Важной задачей по обеспечению безопасности АЭС является физическое разнообразие нейтронных измерительных каналов для систем безопасности. Наряду с решением, примененным в АКНП ЗАО «СНИИП-Систематом», а именно, использование разных типов детекторов для контроля размножающейся среды в активной зоне реактора - ионизационные камеры деления, счетчики нейтронов, можно рассмотреть возможность применения других нейтронных детекторов, в частности ДПЗ.

БД новой неперемещаемой конструкции был применен в составе АКНП при модернизации энергоблока №2 Калининской АЭС. На этапе физического пуска РУ были проведены испытания и комплекс экспериментов:

- проверка метрологических характеристик измерительных каналов АКНП;
- управление реакторной установкой во время изменения мощности РУ;
- проверки линейности изменений показаний мощности по каналам АКНП в ДИ;
- проверки отличия поканальных показаний АКНП от значений мощности реактора.

По результатам экспериментов получены данные о нейтронно-физических характеристиках активной зоны реактора. В частности были сняты и проанализированы показания БД ДИ.

Полученные результаты на остановленном реакторе позволяют сделать следующие выводы:

- БД ДИ исправны и контролируют нейтронно-физические параметры активной зоны РУ;
- показания 6-ти каналов АКНП ДИ идентичны и линейны.

Результаты физического пуска РУ при наборе мощности и выходе на МКУ показали, что БД исправно регистрирует изменения нейтронно-физических параметров активной зоны РУ, что подтверждается изменением в показаниях при проведении экспериментов на МКУ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В работе проведены научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по проектированию новой конструкции БД ДИ с учетом изменившихся условий эксплуатации:

- проанализирован и определен материал составных частей БД: этот материал - нержавеющая сталь;

- выбрана кабельная линия связи: огнестойкий, терморadiационностойкий и не распространяющий горение кабель типа КНММС ТУ 16.К71-244-95;

- экспериментально определена разность чувствительности БД с разным материалом корпуса. Разница по измерениям составляет не более 6%, что допустимо, т.к. при такой разнице, при пороге дискриминации выше уровня шумов, обеспечивается нужная, заданная проектными условиями, величина чувствительности БД;

- теоретически подтверждена возможность использования счетчиков нейтронов в конструкции нового неперемещаемого БД потока тепловых нейтронов в диапазоне источника с учетом изменившихся условий эксплуатации;

- экспериментально определено оптимальное количество счетчиков нейтронов в конструкции БД: это количество равно пяти. Выбор количества счетчиков обоснован экспериментальными лабораторными исследованиями и теоретическими расчетами с учетом факторов, влияющих на изменение чувствительности БД таких, как взаимное экранирование и влияние шумовых характеристик;

- теоретически определена зависимость чувствительности от количества счетчиков в конструкции БД. Чувствительность БД прямо пропорциональна произведению чувствительности одного счетчика и квадратного корня из количества счетчиков;

2. На основании теоретических и экспериментальных данных разработан неперемещаемый БД, соответствующий измененным ВФ, который:

- разработан на основе радиационно-стойкой модификации коронных счетчиков нейтронов и основан на физических принципах и основных конструктивно-технологических решениях по аналогии со счетчиками нейтронов СНМ-11 ОД0.339.070 ТУ.

- предназначен для применения в составе канала аппаратуры контроля нейтронного потока АКНП, выполняющего функции контроля и формирования сигналов управления и защиты реакторной установки с водо-водяным энергетическим реактором ВВЭР в диапазоне источника в составе АСУ ТП энергоблока АЭС;

- обеспечивает повышение надежности и эксплуатационных характеристик канала контроля нейтронного потока АКНП и снижение радиационной нагрузки на персонал;

- обеспечивает повышение надежности канала контроля нейтронного потока АКНП. Достигается благодаря замене кабельной линии связи блока детектирования на основе полимерного кабеля КАГЭ-НФ, обладающего низкой радиационной стойкостью, на огнестойкие, терморезистентные и не распространяющие горение кабели типа КНММС с герметичной оболочкой из нержавеющей стали, внутренним электромагнитным экраном и минеральной изоляцией;

- обеспечивает улучшение эксплуатационных характеристик РУ, а также снижение себестоимости оборудования, размещаемого внутри герметичной защитной оболочки АЭС. Достигается за счет устранения необходимости применения специальных механизмов перемещения БД ДИ и соответствующих устройств для их управления;

3. Проведены все типы испытаний, соответствующие новым условиям эксплуатации и нормам безопасности на АЭС. БД устойчив:

- к воздействию механических, климатических факторов;
- к проникновению твердых предметов и воды при эксплуатации;
- к электромагнитному излучению;
- к гамма-излучению;
- к воздействию внешних факторов в аварийных условиях «малая, большая течь», а так же прочен и герметичен.

4. Проведены ресурсные испытания в натуральных условиях (опытная эксплуатация):

- испытания проводились на энергоблоке № 4 Нововоронежской АЭС» в период 42-ой топливной кампании. Результаты испытаний показали, что по завершении кампании БД не потерял своей работоспособности, а также не потерял чувствительность после нахождения во выключенном состоянии напротив центра активной зоны в полях Гамма $P_{\gamma}=1\div 2\cdot 10^6$ р/ч и тепловых нейтронов;

- набранное значение флюенса соответствует 7-10 годам эксплуатации на АЭС проекта ВВЭР-1000;

- теоретические расчеты по выгоранию радиатора счетчиков совпадают с результатами опытной эксплуатации.

5. Проведены испытания БД с целью утверждения типа средства измерения. Для БД утвержден тип средства измерения и внесен в Государственный реестр средств измерения, получено свидетельство об утверждении типа средств измерений ОС.С.38.050.А № 71997.

6. Проанализированы результаты ввода в эксплуатацию модернизированного комплекса аппаратур АСУ ТП для энергоблока №2 «Калининской АЭС». В составе АКНП был применен БД новой неперемещаемой конструкции. Результаты положительные. Применение подтверждено официальным письмом.

Список сокращений

УД	- устройство детектирования
АЭС	- атомная электростанция
БД	- блок детектирования
Канал ИК	- канал ионизационных камер
ВФ	- воздействующие факторы
АКНП	- аппаратура контроля по нейтронным параметрам
РУ	- реакторная установка
СУЗ	- система управления и защиты
АСУЗ	- автоматизированная система управления и защиты
ДИ	- поддиапазон источника
ПД	- поддиапазон пусковой
РД1	- поддиапазон рабочий 1
РД2	- поддиапазон рабочий 2
ВВЭР	- водо-водяной энергетический реактор
НВАЭС	- Нововоронежская атомная электростанция
АФП	- аппаратура физического пуска
СКП	- система контроля перегрузки

Основные публикации по теме диссертации:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Коптелов Ю.С.** Влияние воздействующих факторов на чувствительность блока детектирования на основе коронных счетчиков СНМ-11. «Ядерная физика и инжиниринг», 2018, том 9, № 6, с. 69–75.

2. **Коптелов Ю.С.** Аппаратура контроля нейтронного потока для АЭС поколения 3+ и 4. «Атомная энергия», 2018, том 125, вып.1, с. 23-26.

Материалы конференций:

1. **Коптелов Ю.С., Миронов А.Ю., Прохоров Ю.Б., Щебатури И.А.** Экспериментальные исследования чувствительности невыгружаемого блока детектирования потока тепловых нейтронов на счетчиках СНМ-11. XIII Курчатовская молодёжная научная школа. Научно исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Сборник аннотаций, 2015. – с. 28-29.

2. **Коптелов Ю.С.** Расчет ресурсных характеристик невыгружаемого блока детектирования тепловых нейтронов в диапазоне источника работы реактора. Конференция молодых специалистов «Инновации в атомной энергетике». Акционерное общество «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н.А. Доллежала», Москва. Сборник докладов, 2015. – с.138-144.

3. **Коптелов Ю.С.** Влияние эффекта экранирования на чувствительность блока детектирования на основе коронных счетчиков СНМ-11. 4-ая Международная научно-техническая конференция «Ввод АЭС в эксплуатацию». «Атомтехэнерго», Москва, Сборник тезисов, 2016. – с.215-216.

4. **Коптелов Ю.С.** Влияние воздействующих факторов на чувствительность блока детектирования на основе коронных счетчиков СНМ-11. XIV Курчатовская междисциплинарная молодёжная научная школа. Научно исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Сборник аннотаций, 2016. – с. 25.

5. **Коптелов Ю. С.** Аппаратура контроля нейтронного потока для АЭС поколения «3+» и «4». Научно-техническая конференция АО «Специализированный научно-исследовательский институт приборостроения». СНИИП, Москва. Труды конференции, 2017.

6. **Коптелов Ю.С.** Аппаратура контроля нейтронного потока для АЭС поколения «3+» и «4». Конференция молодых специалистов «Инновации в атомной энергетике». Акционерное общество «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н.А. Доллежала», Москва. Сборник докладов, 2017. – с.291-300.

7. **Yu. S. Koptelov, D. A. Malenkin, A. Yu. Mironov, and T. A. Sadekov**, “Unmovable Detection Unit of the Thermal Neutron Flux in the Source Range of the Reactor” in XIII International Youth Scientific and Practical Conference “FUTURE OF ATOMIC ENERGY – AtomFuture 2017”, KnE Engineering, pages 389–399. DOI 10.18502/keg.v3i3.1639.

8. **Коптелов Ю.С.** Аппаратура контроля нейтронного потока для АЭС. XII отраслевой научно-технической конференции молодых специалистов Росатома «Высокие технологии атомной отрасли. Молодежь в инновационном процессе» в рамках VI Международного бизнес-саммита ВЗАО «Нижегородская ярмарка», ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова», Нижний Новгород. Труды конференции, 2017.

9. **Коптелов Ю.С.** Влияние флюенса нейтронов на чувствительность блока детектирования на основе коронных счетчиков СНМ-11. XV Курчатовская междисциплинарная молодёжная научная школа. Научно исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва. Сборник аннотаций, 2017. – с.30.

10. **Коптелов Ю.С.** Неперемещаемый блок детектирования потока тепловых нейтронов в диапазоне источника работы реактора. XIII Международная научно-практическая конференция «БУДУЩЕЕ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ», Обнинск. Сборник докладов, 2017, том 1. – с.107-108.

11. **Коптелов Ю.С.** Неперемещаемый блок детектирования плотности потока тепловых нейтронов диапазона источника с повышенными эксплуатационными характеристиками. Одиннадцатая международная научно-техническая конференция «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики», Москва. Труды конференции, 2018.

12. **Коптелов Ю.С.** Экспериментальные исследования чувствительности перемещаемого блока детектирования диапазона источника. II международная (XV региональная) научная конференция «Техногенные системы и экологический риск», Обнинск. Сборник тезисов, 2018. – с.16-18.

13. **Коптелов Ю.С.** Разработка и создание перспективной конструкции блока детектирования диапазона источника систем АКНП для АЭС. XV Международная научно-практическая конференция «БУДУЩЕЕ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ», Обнинск. Сборник тезисов, 2019, том 1. – с.78-80.

14. **Коптелов Ю.С., Миронов А.Ю., Садеков Т.А.** Разработка и создание перспективной конструкции блока детектирования диапазона источника систем АКНП для АЭС. XVI Курчатовская междисциплинарная молодёжная научная школа. Научно исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва. Сборник аннотаций, 2019. – с.16-17.