

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЯДЕРНОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

© 2024 г. С. Б. Чебышов^а, *, И. И. Черкашин^а, А. С. Гордеев^а, А. В. Журавлев^а, Е. М. Ветошкин^а,
А. В. Кишев^а, И. В. Мосягина^а, М. Д. Дерябина^а, В. Г. Голубев^а

^аАО “Специализированный научно-исследовательский институт приборостроения”, Москва, Россия

*E-mail: SBoChebyshov@sniip.ru

Поступила в редакцию 23.05.2023 г.

После доработки 04.08.2023 г.

Принята к публикации 07.08.2023 г.

В работе рассматриваются структура и состав измерительных задач радиационного контроля на примере энергоблоков АС, как объектов на которых наиболее системно и полно реализуется весь комплекс радиационных измерений в обеспечении ядерной и радиационной безопасности. Показан достигнутый уровень состояния изделий ядерного приборостроения (ЯП). Представлены основные направления и проблемные вопросы развития ядерного приборостроения, включая совершенствование методов измерения и метрологического обеспечения измерений ионизирующего излучения. Представлены ключевые направления математического моделирования при разработке аппаратуры.

Ключевые слова: радиационный контроль, измерительные задачи, метрологическое обеспечение измерений ионизирующего излучения, перспективные направления развития измерений ионизирующего излучения, программно-математические средства моделирования

DOI: 10.56304/S2079562923030107

ВВЕДЕНИЕ

В конце 1990-х гг. ядерное приборостроение, как и практически все отрасли реальной экономики в нашей стране столкнулось с серьезным кризисом. Ключевая причина – резкое сокращение работ в области атомной энергетики и ядерного топливного цикла. Начиная с 2000 г., ситуация стала постепенно меняться. Появились экспортные проекты в Китае (Тяньваньская АЭС), затем начал реализовываться индийский проект (АЭС Кунданкулам), внутри страны возобновилось строительство 3-го энергоблока Калининской АЭС, затем началось строительство 4-го энергоблока этой станции, параллельно возобновились работы по строительству 3 и 4-го энергоблоков Ростовской АЭС. Начиная с 2005–2006 гг. начал реализовываться проект “АЭС-2006”, направленный на создание энергоблоков с мощностью 1200 МВт с существенно улучшенными техническими и экономическими характеристиками. Реализация данного проекта “АЭС 2006” показала необходимость разработки новых систем, практически по всем функциональным составляющим АСУ ТП энергоблока. Не в последнюю очередь это относилось и к системам радиационного и дозиметрического контроля [1–9].

СТРУКТУРА И СОСТАВ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЗАДАЧИ РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ НА ПРИМЕРЕ АС

На рис. 1 представлена обобщенная структура измерительных задач радиационного контроля для энергоблока АЭС с реактором ВВЭР, сформированная в соответствии с [6]. Как можно видеть из приведенной структуры, на энергоблоках АЭС, в наиболее полном составе и системно реализуются практически все виды радиационного контроля на основе технических средств, образующих основной, базовый состав приборов для измерения ионизирующих излучений, в свою очередь являющихся базовой составляющей ядерного приборостроения в целом [10–13]. Для каждого функционала контроля определена группа измерений в нормальной радиационной обстановке и, соответственно для измерений в случае возникновения аварийных ситуаций. Весь комплекс измерительных задач разделен на несколько групп: радиационный технологический контроль (РТК), радиационный контроль помещений и промышленной площадки АС (РКП), автоматизированный индивидуальный дозиметрический контроль (АСИДК), контроль радиоактивного загрязнения (РКЗ), радиационный контроль окружающей среды (РКОС) и автоматизированная система контроля радиационной обстановки (АСКРО).

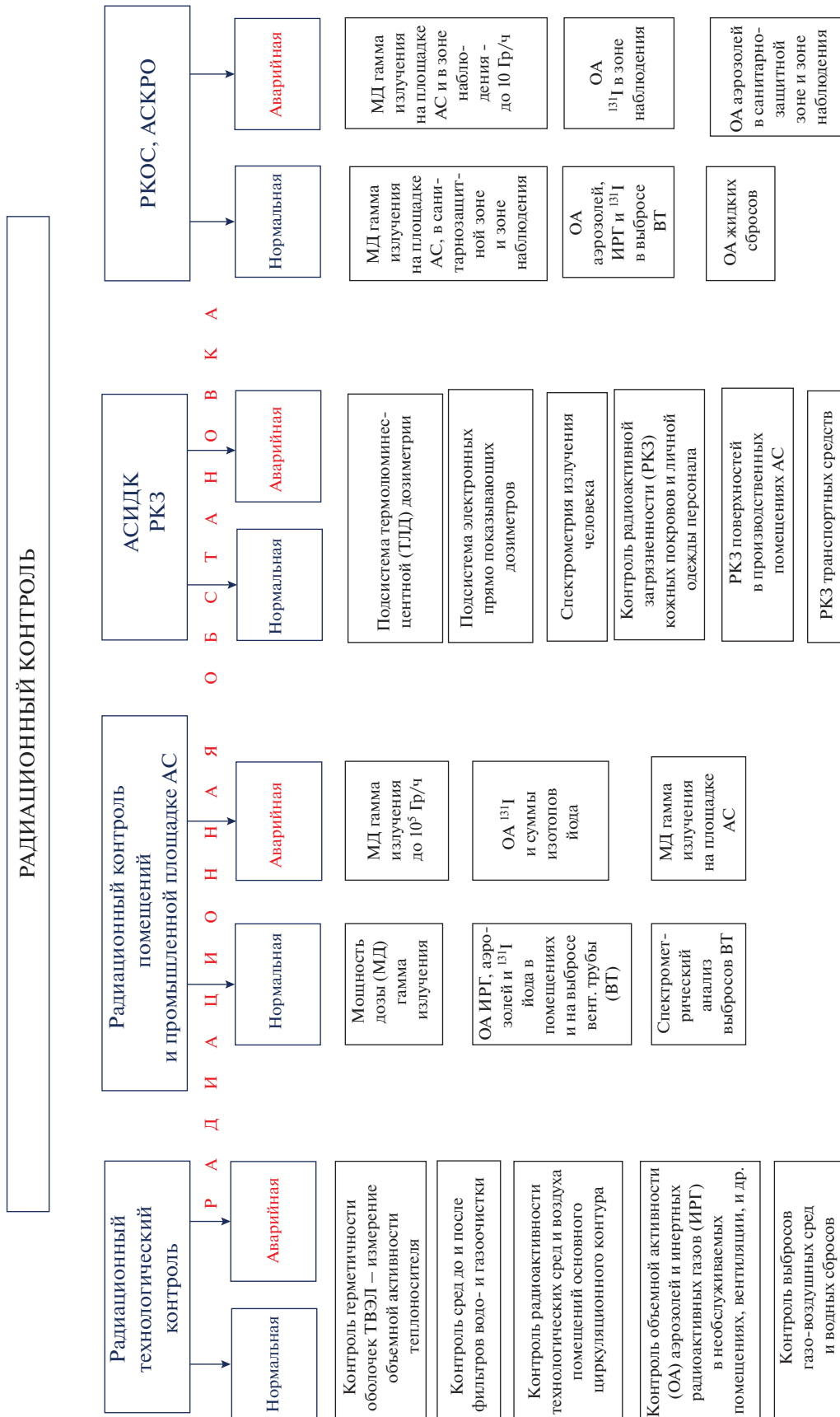


Рис. 1. Обобщенная структура измерительных задач радиационного контроля для энергоблока АЭС с реактором ВВЭР.

Соответственно в РТК, РКП и РКОС включены измерения:

- Мощности амбиентной эквивалентной дозы (МАЭД) гамма-излучения, Зв/ч;
- Мощности поглощенной дозы (МПД) гамма-излучения, Гр/ч;
- МПД в аварийных условиях, Гр/ч;
- Объемной активности (ОА) инертных радиоактивных газов (ИРГ)*, Бк/м³;
- ОА ИРГ в аварийных условиях, Бк/м³;
- ОА радиоактивных аэрозолей* (α -, β - излучение), Бк/м³;
- ОА йода-131*, Бк/м³;
- ОА технологических сред (бесконтактный вариант) Бк/м³;
- ОА жидких сред (проточный вариант) Бк/м³;
- ОА жидких сред (погружной вариант) Бк/м³;
- ОА азота-16, Бк/м³;
- ОА натрия-24 в солевом остатке, Бк/м³;
- ОА радионуклидов в теплоносителе 1 контура, Бк/м³;
- ОА нормируемых радионуклидов в выбросах и сбросах, Бк/м³

• ОА активности трития и углерода в выбросах АС и ОА трития в выбросах брызгальных бассейнов;

* измерительные каналы применяются в стационарном и мобильном исполнении;

Индивидуальный дозиметрический контроль (ИДК), должен реализовывать измерения:

- эквивалентной дозы рентгеновского и гамма-излучения $H_p(10)$, Зв;
- эквивалентной дозы рентгеновского, гамма и бета- излучения $H_p(0.07)$, Зв;
- эквивалентной дозы нейтронного излучения $H_p(10)$, Зв;
- активность радионуклидов в щитовидной железе, легких и теле (СИЧ), Бк;

Как, уже отмечалось выше, в состав радиационного контроля входят и технические средства измерения, предназначенные для отслеживания радиационного состояния энергоблока при нештатных ситуациях, включая запроектные аварии.

В состав каналов данного назначения, к настоящему времени включены приборные средства, обеспечивающие измерения:

- МПД фотонного излучения в герметичном объеме реакторной установки, до 10⁵ Гр/ч;
- МПД фотонного излучения продувочной воды из системы продувки-подпитки первого контура, до 10⁻¹ Гр/ч;
- МПД фотонного излучения системы аварийного расхолаживания реактора САОЗ и оболочек ТВЭЛ в бассейне выдержки, до 10 Гр/ч;

- МПД фотонного излучения от паропровода БРУА**, до 10 Гр/ч;

- МПД фотонного излучения в воздухозаборных камерах приточной вентиляции на БПУ и РПУ, до 10⁻³ Гр/ч;

- МАЭД фотонного излучения в помещениях БПУ и РПУ, до 10⁻¹ Зв/ч;

- ОА воды контура аварийного охлаждения активной зоны, до 10⁸ Бк/м³;

- ОА технической воды, направляемой на внешние сооружения, (градирни, брызгальные бассейны и т.д.) для охлаждения, до 10⁶ Бк/м³;

- ОА ИРГ в вентиляционных коробах системы вентиляции, под герметичной оболочкой, до 10⁹ Бк/м³;

- ОА газовых и аэрозольных выбросов, до 10¹³ Бк/м³; бета-аэрозолей, до 10⁵ Бк/м³; МПД фотонного излучения, до 10 Гр/ч и паров йода-131 через вентиляционную трубу (ВТ) энергоблока, до 10⁵ Бк/м³;

- ОА йода-131 в воздухозаборных камерах приточных систем вентиляции на блочном и резервном пультах управления, до 10⁵ Бк/м³;

** БРУА –быстродействующая редуцирующая установка сброса пара в атмосферу.

РЕАЛИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ОПЫТНО-КОНСТРУКТОРСКИХ РАБОТ

Активная фаза исследований по отработке новых, перспективных методов измерений, поиску наиболее оптимальных приборных решений, отработке методических вопросов, алгоритмов измерений, уточнении метрологических характеристик вновь создаваемых приборов началась в 2019 г. Ключевым проектом в этом комплексе работ является НИОКР “Кайман”. В рамках данного проекта разрабатывается восемь типов базовых программно-технических средств для измерения основных радиометрических и спектрометрических характеристик, которые используются при контроле эффективности защитных барьеров энергоблока АЭС и состояния технологического оборудования, при оценке безопасной эксплуатации ядерной энергетической установки по уровням допустимого воздействия на персонал, население и окружающую среду на промышленной площадке, в санитарно-защитной зоне и зоне наблюдения объекта [14–17]. Перечень контролируемых параметров включает объемную активность радиоактивных аэрозолей, йода-131, инертных радиоактивных газов, воды, изотопный состав теплоносителя первого контура АЭС и воздуха, удаляемого через системы вентиляции. Созданные в рамках этой работы новые типы приборов, стали основой для

Таблица 1. Сравнительный анализ диапазонов измерений технических средств РТК

Измерение	АО “СНИИП”	Merion Тес. (НПП “Радико”) [25]	НПП “Доза” [26]
МПД, Гр/ч	БДРГ-42Р ($1.0 \cdot 10^{-7}$ – $1.0 \cdot 10^2$)	УДМГ-204 ($1.0 \cdot 10^{-7}$ – $1.0 \cdot 10^2$)	ДБГ-С11Д ($1.0 \cdot 10^{-7}$ – $1.0 \cdot 10^2$)
МАЭД, Зв/ч	БДБГ-13Р ($1.0 \cdot 10^{-7}$ – $1.0 \cdot 10^2$)	УДМГ-102 ($1.0 \cdot 10^{-7}$ – $1.0 \cdot 10^1$)	УДМГ-100 ($1.0 \cdot 10^{-7}$ – $1.0 \cdot 10^1$)
ОА ИРГ, Бк/м ³	УДГБ-47Р ($1.0 \cdot 10^3$ – $1.0 \cdot 10^{11}$)	УДГБ-204 ($1.0 \cdot 10^4$ – $3.7 \cdot 10^{10}$)	УДГ-1Б ($1.0 \cdot 10^4$ – $3.7 \cdot 10^{10}$)
ОА йода-131, Бк/м ³	УДАГ-09Р ($1.0 \cdot 10^{-2}$ – $1.0 \cdot 10^7$)	УДИ-201 ($3.7 \cdot 10^{-2}$ – $3.7 \cdot 10^6$)	УДИ-1Б ($3.0 \cdot 10^{-2}$ – $3.7 \cdot 10^6$)
ОА радиоактивных аэрозолей (α -, β - излучение)	БДАС-05Р (α : $1.0 \cdot 10^{-2}$ – $1.0 \cdot 10^6$. β : $2.0 \cdot 10^{-2}$ – $1.0 \cdot 10^7$)	УДАС-201 (α : $1.0 \cdot 10^{-2}$ – $3.7 \cdot 10^5$. β : $1.0 \cdot 10^{-1}$ – $1.1 \cdot 10^7$)	УДА-1АБ (α : $1.0 \cdot 10^{-2}$ – $2.0 \cdot 10^5$. β : $1.0 \cdot 10^{-1}$ – $1.0 \cdot 10^7$)
ОА жидкости (погружное и проточное исполнения), Бк/м ³	УДЖГ-43Р ($1.0 \cdot 10^3$ – $1.0 \cdot 10^{10}$)	УДЖГ-211 ($1.0 \cdot 10^3$ – $3.7 \cdot 10^8$)	УДГП-01 ($4.0 \cdot 10^2$ – $4.0 \cdot 10^8$)
ОА гамма-излучающих радионуклидов в теплоносителе (N-16), Бк/м ³	УДПГ-08Р1 ($1.5 \cdot 10^2$ – $2.0 \cdot 10^8$)	УДПГ-202 ($0.5 \cdot 10^3$ – $3.7 \cdot 10^9$)	УДГП-01 ($1.0 \cdot 10^3$ – $3.7 \cdot 10^8$)

реализации РТК, РКOC, РКП в составе АСРК реализуемых проектов АС.

К настоящему времени в различной стадии выполнения выполняется комплекс НИОКР, включающий в себя следующие направления:

- Совершенствование продуктовой линейки гражданского назначения (“Кайман”).
- Совершенствование программно-технических средств радиационного контроля двойного назначения (“Нарвал”).
- Разработка комплекса постов радиационно-экологического контроля для построения унифицированных АСКРО (“Нордик”).
- Разработка программно-технического комплекса автоматизированного дозиметрического контроля (“Риф”).
- Разработка программно-технического комплекса измерения концентрации бора в теплоносителе (“АБН”).
- Разработка стендовой базы экспериментальной метрологии.

При выполнении указанных работ положены следующие принципы:

1. Соответствие характеристик, разрабатываемых изделий актуальным нормативным требованиям, относящихся к приборному обеспечению радиационного и дозиметрического контроля.
2. Разрабатываемые приборы по устойчивости к внешним воздействующим факторам и измерительным характеристикам должны соответствовать

самым жестким требованиям реализуемых проектов АЭС.

3. При разработке новых приборов в максимальной степени должны учитываться решения, заложенные в аналогичные приборы предыдущих поколений и опыт их эксплуатации.

4. Конструкторские решения новых приборов должны позволять размещать их на установочных местах заменяемых приборов при проведении модернизации оборудования радиационного контроля.

5. Разработка приборов должна включать и разработку новых методов измерения, там, где это целесообразно [18–20].

6. При разработке приборов должны в разумных рамках применяться перспективные типы детекторов, с учетом границ применимости и технологической готовности [18, 21, 22].

7. Методы измерения должны преимущественно основываться на программно-математической обработке первичных сигналов [23–24].

В качестве примера, в табл. 1 представлено сравнение основных параметров приборов, разрабатываемых в рамках темы “Кайман” с параметрами приборов – аналогов.

ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ РАЗВИТИЯ ЯДЕРНОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

В процессе работы по проектам, выявлены и проблемные вопросы имеющие важное значение для ядерного приборостроения в целом, некоторые из них, имеющие на наш взгляд существен-

ное значение. В первую очередь это относится к вопросам метрологического обеспечения измерений. Для измерений гамма-излучения, на наш взгляд, актуально решение вопросов метрологии в крайних точках измерительного диапазона, а именно — в области низкофоновых измерений — от 10^{-8} Зв/ч, и, при измерениях свыше 100 Гр/ч (100 Зв/ч). Требуют решения и задача метрологического обеспечения измерений гамма-излучения с энергиями до 10 МэВ. К следующей группе задач требующих своего решения следует отнести комплекс вопросов, связанных с нейтронными дозиметрическими измерениями, а именно метрологии во всех энергетических диапазонах нейтронного излучения, потребность спектральной аттестации нейтронных стендов, и, развитие на этой основе работ по повышению точности нейтронной дозиметрии. Особо следует выделить актуальность развития работ по выпуску стандартных активационных образцов для метрологического сопровождения при испытаниях и аттестационных измерениях во всем энергетическом диапазоне нейтронов, воспроизводимых изотопными источниками, нейтронными генераторами, критическими сборками и исследовательскими и экспериментальными реакторами. Актуальной задачей обеспечения заданной точности измерений в установках контроля радиоактивного загрязнения является выпуск и аттестация образцовых источников с нормированной неравномерностью плотности потока частиц (рабочий эталон радиометра поверхностной активности). Для метрологического обеспечения измерений объемной активности аэрозолей актуальной задачей является проведение испытаний в целях утверждения типа САИ (в ранге эталонного СИ), работы в данном направлении в настоящее время ведутся АО «СНИИП». Планируемое окончание работ — декабрь 2023 г. Следующей актуальной задачей является метрологическое обеспечение «on-line» измерений ОА жидких сред, а именно создание и аттестация натурального стенда в статусе рабочего эталона, эту работу АО «СНИИП» также планирует завершить в 2023 г. Метрологическое обеспечение измерений ОА ИРГ в значительной степени базируется на применении «твердых» радионуклидных источников, поскольку из всей изотопной номенклатуры нуклидов ИРГ, коммерчески на рынке доступны только ампулы ^{85}Kr , ^{14}C и ^3T . Для расширенной метрологии применяются, в соответствии со стандартом МЭК 60761 (части 1 и 3) применяются радионуклидные источники: ^{204}Tl — замещение ^{85}Kr ; ^{241}Am — замещение ^{133}Xe ; ^{204}Tl — замещение ^{135}Xe ; ^{90}Sr — ^{90}Y — замещение ^{41}Ag и ряд других «твердых» источников. Однако в настоящее время выявились ограниченные возможности приобретения образцовых «твердых» источников по номенклатуре и активности, что затрудняет проведение метрологических испытаний. И завершая рассмотрение наиболее важных проблемных во-

просах, остановимся на метрологическом обеспечении индивидуальной дозиметрии нейтронного излучений. В этом направлении требует безотлагательного решения задача метрологического обеспечения дозиметрии нейтронов в диапазоне энергий: 0.025 эВ — 6 МэВ с обеспечением диапазона измерения накопленной дозы от 10^{-5} до 10 Зв, причем измерение накопленной дозы в верхней части диапазона для радионуклидных источников нейтронов задача проблемная, поскольку требует значительного времени облучения (от месяца и более).

ЗАДАЧИ РАЗВИТИЯ НА БЛИЖАЙШУЮ ПЕРСПЕКТИВУ

Переходя к рассмотрению задач развития техники измерения ионизирующего излучения на ближайшие 5 лет, прежде всего хотелось бы остановиться на вопросах применения методов цифрового моделирования и проектирования. В настоящее время АО «СНИИП» использует 36 программных пакетов для цифрового моделирования и проектирования, рис. 2. Как можно видеть из представленной иллюстрации мы разбили весь процесс разработки на 6 основных составляющих:

- моделирование физических процессов взаимодействия ионизирующего излучения с веществом;
- моделирование схемотехнических решений и разработка топологии печатных плат;
- разработка прикладного программного обеспечения и алгоритмов обработки измерительной информации;
- разработка и моделирование конструкций блоков детектирования для измерения радиоактивности сред;
- моделирование и расчет устойчивости конструкций к внешним воздействующим факторам — сейсмические воздействия, удары, вибрация, повышенная/пониженная температура;
- автоматизированная разработка конструкторской документации;

Приведем несколько примеров. По направлению моделирования физических процессов применен программный продукт (ПП) МСС МТ при разработке устройств детектирования, требующих оценки эффективности регистрации излучения с целью определения оптимального объема измерительных камер и геометрии детекторов.

До момента внедрения программного продукта МСС МТ (ПП) выбор геометрии и объема измерительных камер устройств детектирования проточного типа, а также вида и размера детектора производился с помощью экспертной оценки. Указанный подход не позволял определить оптимальную геометрию измерения, т.к. был затруднен учет конкурирующих процессов, возникаю-



Рис. 2. Состав программных пакетов, применяемых при разработке изделий ядерного приборостроения в СНИИП.

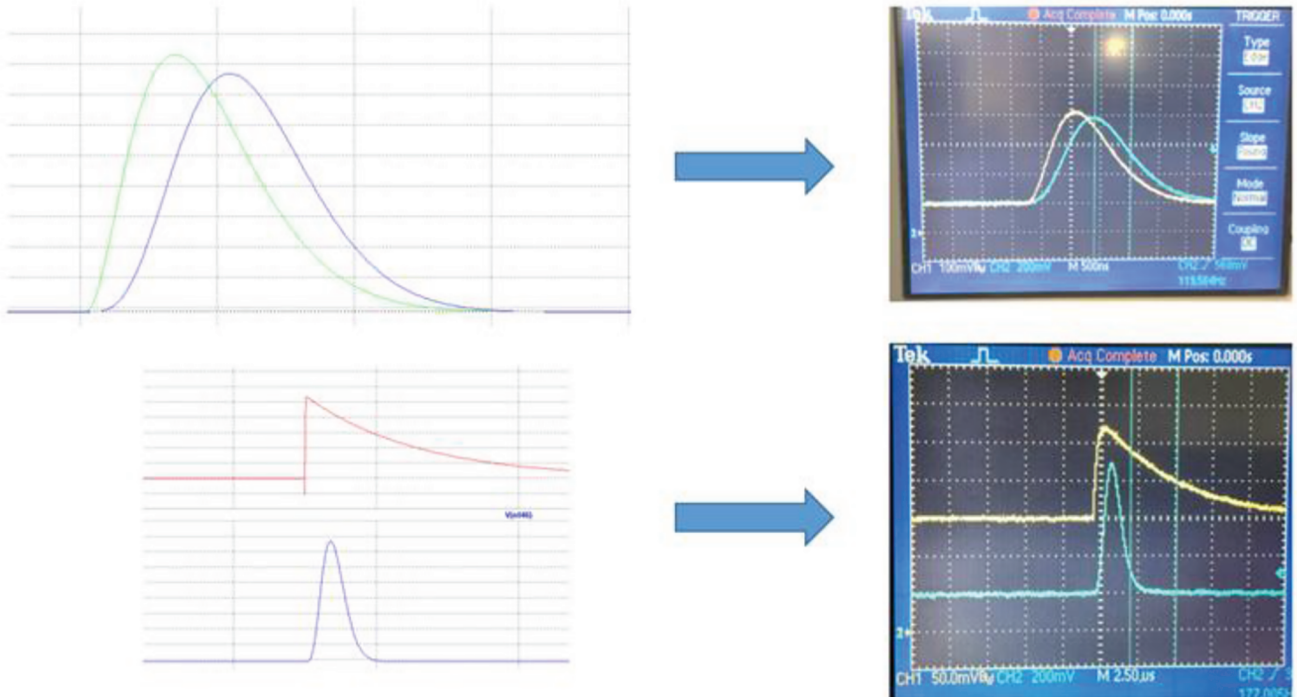


Рис. 3. Сравнение сигналов модели и реальной схемы.

щих при варьировании размеров устройств детектирования: с одной стороны, увеличение объема измерительной камеры должно обеспечивать возможность измерения более низкой активности среды, с другой стороны, увеличение измерительной камеры сопряжено с ростом неравномерного самопоглощения квантов различной энергии в контролируемой среде. Благодаря внедрению ПП при разработке измерительных камер детекторов появилась возможность оценивать эффективность регистрации устройств детектирования в различных геометриях до этапа изготовления опытного образца. Дополнительным преимуществом использования, указанного ПП стала возможность выбирать параметры детектора (материал, форму, размеры, размещение в измерительной камере), позволяющие обеспечить измерения в требуемых диапазонах с заданной точностью. По итогам моделирования в ПП стало возможно изготовление единственного опытного образца в оптимальной геометрии без необходимости одновременного изготовления нескольких образцов различных форм и размеров. Работы по внедрению ПП при оценке оптимальной геометрии измерительной камеры в полной мере показали свою эффективность при создании устройства для измерения объемной активности жидких сред. Расчеты, выполненные в ПП, позволили выбрать объем измерительной камеры, позволяющий как проводить измерение сред с минимальной активностью ($\sim 10^3$ Бк/м³), так и контролировать жидкость вы-

сокой активности ($\sim 10^8$ Бк/м³). Благодаря внедрению ПП появилась возможность оперативно определить требования к конструкции устройства детектирования и приступить в сжатые сроки к изготовлению опытного образца.

Рассмотрим применение программного продукта (ПП) SPICE-моделирования. До его применения при разработке нового оборудования требовалось изготавливать большое количество макетных образцов с последующей длительной работой по их отладке. Данный ПП позволяет оценить работу электрической схемы и ее отдельных узлов, проводить измерения “идеальными” приборами, которые не влияют на работу схемы, определить влияние различных компонентов на режимы работы схемы, определить влияние дестабилизирующих факторов: температуры, изменение питающего напряжения, неточность изготовления электронных компонентов. В частности, благодаря внедрению SPICE-моделирования при разработке спектрометрического блока детектирования из состава устройства детектирования объемной активности ¹³¹I и некоторых узлов из состава устройств детектирования объемной активности ИРГ и объемной активности жидких сред удалось сэкономить большое количество времени, т.к. по результатам моделирования из различных вариантов схемотехнических решений отобрано то, которое показывало наилучшие результаты, получены ожидаемые осциллограммы сигналов с различных узлов еще до начала изготовления макетов и опытных

образцов. На остальные варианты схем время и средства для их макетирования и наладки не затрачивались. На рис. 3 представлены осциллограммы сигналов модели и реальной схемы, как видно из рисунка, работа реальной схемы практически полностью соответствует модели. Внедрение SPICE-моделирования позволило сформировать принципиально новый подход в разработке и отладке электрических схем.

Рассмотренные, в качестве примеров ПП, позволили на этапах разработки сэкономить примерно два года работы и значительный объем финансовых ресурсов.

К числу перспективных, мы также отнесли, исходя из опыта реализации проектов поставки оборудования АСРК в период 2017–2022 гг., следующие направления:

– Применение принципов искусственного интеллекта в системах радиационного контроля.

– Разработка аппаратного комплекса оперативной дозиметрии на основе прямопоказывающих электронных γ - β и γ - n дозиметров.

– Разработка нового ТЛД-комплекса с улучшенными характеристиками автоматизации процесса обмера дозиметров.

– Развитие стендовой базы экспериментальной метрологии нейтронной дозиметрии (Еп: 0.025 эВ–20 МэВ).

– Развитие стендовой базы экспериментальной метрологии высокопоточного гамма-излучения и метрологии «жесткого» гамма-излучения с энергиями до 10 МэВ.

– Развитие стендовой базы экспериментальной метрологии обеспечения низкофоновых измерений гамма-излучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ядерное приборостроение играет важнейшую роль в обеспечении эффективной безопасной работы всех без исключения объектов использования атомной энергии: энергоблоков АЭС, исследовательских ядерных реакторов, предприятий ядерного топливного цикла, хранилищ радиоактивных отходов и пр. В настоящее время отечественное ядерное приборостроение обеспечивает все основные потребности отрасли в радиометрических, дозиметрических и спектрометрических измерениях. В то же время представленные в работе проблемные вопросы требуют скорейшего решения. Особо следует подчеркнуть необходимость концентрации усилий на развитии программно-математических средств для дальнейшего совершенствования программных продуктов моделирования, применяемых на всех этапах разработки приборов, комплексов и систем. И, актуальной, не смотря на сложность задачи, является расширение работ по интеграции в программно-мате-

матическое обеспечение систем радиационного контроля элементов искусственного интеллекта, для более совершенной реализации предиктивной аналитики состояния защитных барьеров от воздействия радиационных факторов на человека и окружающую среду.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Федеральный закон №170-ФЗ “Об использовании атомной энергии” от 21.11.1995.
2. Федеральный закон №3-ФЗ “О радиационной безопасности населения” от 09.01.1996.
3. ОПБ-88/97. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций, ПНАЭГ-01-011-97. 1997.
4. ОСПОРБ-99. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности. СП 2.6.1. 799-99. 2000.
5. НРБ-99/2009. Нормы радиационной безопасности. Сан ПиН 2.6.1. 2523-09. 2009.
6. СП АС-03. Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций. САНПИН 2.6.1.24-03. 2003.
7. НП-001-15. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. 2015.
8. IAEA-TECDOC-1092/R. Руководство по мониторингу при ядерных и радиационных авариях. 2002.
9. GSR-3. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. 2014.
10. МЭК 60761-3. Оборудование для постоянного контроля радиоактивности в газообразных выбросах. Специальные требования к устройствам, измеряющим содержание радиоактивных благородных газов в газообразных выбросах. 2002.
11. ГОСТ Р МЭК 61513. Атомные электростанции. Системы контроля и управления, важные для безопасности. Общие требования. 2001.
12. IEC 61504. Атомные электростанции. Системы контроля и управления, важные для безопасности. Системы радиационного контроля. 2017
13. Безопасность атомных станций: Справочник. 2000. Москва: Росэннергоатом.
14. Кутьков В.А., Поленов Б.В., Черкашин В.А. Радиационная безопасность и радиационный контроль. Т. 1. 2008. Обнинск: НОУ “ЦИПК”. С. 222–236.
15. Кутьков В.А., Поленов Б.В., Черкашин В.А. Радиационная безопасность и радиационный контроль. Т. 2. 2008. Обнинск: НОУ “ЦИПК”. С. 81–97.
16. Кутьков В.А., Поленов Б.В., Черкашин В.А. Радиационная безопасность и радиационный контроль. Т. 2. 2008. Обнинск: НОУ “ЦИПК”. С. 128–144.
17. Кутьков В.А., Поленов Б.В., Черкашин В.А. Радиационная безопасность и радиационный контроль. Т. 2. 2008. Обнинск: НОУ “ЦИПК”. С. 208–236.
18. Knoll G.F. Radiation Detection and Measurements. 3rd Ed. 2000. New York: Wiley.
19. Nakhostin M. Signal Processing for Radiation Detectors. 2018. Hoboken: Wiley.

20. *Smith S.W.* Scientific and Engineers Guide to Digital Signal Processing. 2nd Ed. 1999. San Diego: California Technical Publishing.
21. *Rajakrishna K. et al.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2021. V. 68 (6). P. 1286.
22. *Liu G. et al.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2010. V. 57 (3). P. 1682.
23. *Allison J. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2016. V. 835. P. 186.
24. *Wang J. et al.* // Appl. Radiat. Isotopes. 2014. V. 70. P. 1166.
25. Рекламно-каталожная информация фирмы MGP INSTRUMENTS. 2021.
26. Рекламно-каталожная информация НПП “Доза”. 2022 .
27. *Гиллярович Э.Л и др.* Современная практика обеспечения качества измерений ионизирующих излучений. Ядерные измерительно-информационные технологии. 1997. Москва: Труды НИЦ “СНИИП”.

Prospects for Development of Nuclear Instrumentation

**S. B. Chebyshov^{1, *}, I. I. Cherkashin¹, A. S. Gordeev¹, A. V. Zhuravlev¹, E. M. Vetoshkin¹, A. V. Kishev¹,
I. V. Mosyagina¹, M. D. Deryabina¹, and V. G. Golubev¹**

¹*JSC Specialized Research Institute of Instrument Engineering, Moscow, 115093 Russia*

**e-mail: SBoChebyshov@sniip.ru*

Received May 23, 2023; revised August 4, 2023; accepted August 7, 2023

Abstract—The paper considers structure and composition of the measurement tasks of radiation monitoring by the example of power units of nuclear power plants as objects on which the entire complex of radiation measurements in ensuring nuclear and radiation safety has been most systematically and fully implemented. The achieved level of the state of products of nuclear instrumentation (NI) has been shown. The main directions and problematic issues of the development of nuclear instrumentation, including improvement of measurement methods and metrological support for measurements of ionizing radiation, are presented. The key directions of mathematical modeling in the development of equipment are presented.

Keywords: radiation monitoring, measurement tasks, metrological support for ionizing radiation measurements, promising directions for the development of ionizing radiation measurements, software and mathematical modeling tools