

ИНЖЕНЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

УДК 006.072.025

ИНЖЕНЕРНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ПОДХОД ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ИННОВАЦИОННЫХ РАЗРАБОТОК ИЗДЕЛИЙ ЯДЕРНОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

© 2025 г. Д. Ю. Байдаров^а, Д. Ю. Файков^б, С. Б. Чебышов^с *,
А. С. Гордеев^с, А. А. Иванов^с, А. В. Калинин^с

^аГосударственная корпорация по атомной энергии “Росатом”, Москва, 119017 Россия

^бРоссийский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики, Саров, Нижегородская обл., 607188 Россия

^сАО “СНИИП”, Москва, 123060 Россия

*E-mail: SBoChebyshov@sniip.ru

Поступила в редакцию 29.05.2024 г.

После доработки 29.05.2024 г.

Принята к публикации 10.06.2024 г.

В статье на примере нескольких типов оборудования радиационного контроля рассматриваются инновационные инженерные решения как иллюстрация комплексного инженерно-экономического подхода при создании новых изделий. Как один из наиболее характерных параметров для данного вида продукции, рассматривается вопрос конструирования новой аппаратуры с учетом опыта эксплуатации приборов-прототипов. Показаны эффекты, достигаемые при применении новых материалов и технологических решений.

Ключевые слова: радиационный контроль, защита от внешнего фона, конструкторско-технологические решения

DOI: 10.56304/S2079562924060058

ВВЕДЕНИЕ

Создание новых типов приборов и оборудования радиационного контроля, обладающих лучшими технико-экономическими показателями, является актуальной задачей [1–13]. При традиционных подходах к созданию новой техники в большинстве случаев преобладает применение инновационных решений в фокусе достижения улучшенных (рекордных) технических характеристик, и прежде всего диапазона и точности измерений. Однако достаточно случаев на практике, когда такой подход негативно сказывается на интегральной оценке прибора, и в первую очередь в жертву приносятся экономические характеристики или их производные — технологичность, себестоимость, стоимость владения на объекте использования. Проводимая работа в форме НИОКР по совершенствованию продуктовой линейки гражданского назначения (тема “Кайман”) имеет одной из своих целей достижение оптимального сочетания технических и экономических характеристик разрабатываемой новой техники, при этом применяется оптимизационный подход не только для достижения требуемых (конкурентоспособных на рынке ядерного приборостроения)

измерительных характеристик, но одновременно на каждом этапе разработки анализируется “цена” того или иного решения. В данной статье авторами, на примере разработки нескольких типов программно-технических средств радиационного контроля, проиллюстрировано принятие решений на основании и инженерного, и экономического анализа.

Цель работы — выработать подход по применению инженерно-экономического анализа к разработке оборудования радиационного контроля для атомных электростанций.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Международные практики и методы управления НИОКР в наукоемких предприятиях рассмотрены в достаточно обширном корпусе литературных источников, например, в отраслевом аналитическом отчете [14] рассмотрены вопросы оценки эффективности результатов научных исследований в крупных зарубежных корпорациях и органах государственного управления в области использования атомной энергии.

Основные принципы применения инженерных и экономических инструментов проработаны достаточно хорошо, но специализированные публикации в сфере создания программно-технических средств для обеспечения радиационной безопасности, как в сфере важных общественных благ, производимых атомной отраслью, практически отсутствуют. С учетом важности направления ядерного приборостроения для перспективного развития рассмотрим применение инженерно-экономического подхода при создании оборудования радиационного контроля, входящего в состав автоматизированных систем радиационного контроля (АСРК).

НАПРАВЛЕНИЯ РАБОТ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОДОЛОГИЯ

В перечень контролируемых параметров, предназначенных для радиационного контроля эффективности защитных барьеров энергоблока АС, состояния технологического оборудования, оценки 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, в обязательном порядке входят измерения объемной активности радиоактивных аэрозолей, йода-131, инертных радиоактивных газов, жидких сред [15–18]. Созданные в рамках НИОКР “Кайман” новые типы приборов стали основой построения АСРК в реализуемых проектах строительства энергоблоков с реакторами ВВЭР. Достаточно сказать, что, из 250–300 измерительных каналов современной АСРК 80% строится на оборудовании, созданном в рамках проекта “Кайман”.

При выборе стратегии выполнения этой НИОКР наряду с достижением требуемых технических параметров, таких как точность и диапазоны измерений, повышение интеллектуальности новых приборов и прочих, ключевое внимание уделялось таким факторам, как учет предыдущего опыта проектного применения аналогичных приборов предыдущего поколения, существенное повышение технологичности производства (т.е. снижение себестоимости изготовления при серийном выпуске), удобство эксплуатации приборов, в том числе и сокращение трудозатрат на размещение оборудования на энергоблоке (учитываемых в стоимости владения). Значимым фактором для нас стало решение задач создания таких конструкций приборов, которые позволяли бы без строительных доработок устанавливать новое оборудование вместо заменяемого, устаревшего, в рамках программ модернизации действующих энергоблоков. Таким образом, пред нами встала комплексная задача — достижение конкурентных технических характеристик при одновременном снижении стоимости

производства. К числу параметров, определяющих техническую конкурентоспособность продукции, следует отнести: метрологические и эксплуатационные характеристики (надежность, диапазон и точность измерений, габаритные размеры и масса оборудования, диапазон регистрируемых энергий, дополнительная погрешность при воздействии механических и климатических факторов окружающей среды, универсальность внешних интерфейсов, ремонтпригодность, самодиагностика и другие показатели назначения).

Современным изделиям ядерного приборостроения свойственны усложнение функций, повышение точности измерений, сокращение времени обработки информации, повышение устойчивости к внешним воздействующим факторам, включая уровень внешнего радиационного фона, требование селективности регистрации заданного вида излучения [19, 20]. Объективно, это приводит к существенному усложнению приборов, в некоторых случаях объем оборудования радиационного контроля за последние 15–20 лет увеличился, по разным оценкам, до 10 раз, при соответствующем росте цен на это оборудование. Эта тенденция привела, с одной стороны, к улучшению технических характеристик приборов, но и обусловила противоречия в способах комплексного улучшения качества приборов. Увеличение сложности приборов приводит к их удорожанию, снижению их надежности, затрудняет монтаж оборудования на объекте, усложняет их эксплуатацию. Рост числа компонентов оборудования увеличивает массу и физические размеры приборов, ведет к снижению технологичности и повышению себестоимости производства. В то же время, одним из главных на сегодня требований, предъявляемых к любому оборудованию ядерных технологий, является его надежность. С усложнением прибора, существенно возрастает риск получения такого приборного продукта, применение которого для решения целевой задачи станет нецелесообразным. Как итог, при выработке стратегии разработки изделий в рамках проекта “Кайман” мы сформулировали, наряду с техническими характеристиками, жесткие требования по массе изделий, габаритам, простоте конструкторских решений, технологичности, эксплуатационной надежности и устойчивости к максимально жестким условиям окружающей среды. Другими словами, при разработке приборов мы считали основной задачей выработку подходов по преодолению противоречий, указанных выше, и выбор для конкретных типов приборов, исходя из проектных условий их эксплуатации, оптимальных соотношений основных характеристик изделий.

Для принятого нами подхода рассмотрим в качестве примера разработку трех типов приборов радиационного технологического контроля.

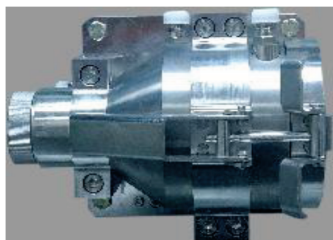


Рис. 1. Внешний вид УДАГ-09Р, масса — 61 кг, диаметр — 150 мм, линейный размер — 300 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Устройство детектирования объемной активности (ОА) радиоактивного йода-131 в воздухе

В объем радиационного контроля АСРК любой АЭС входит оборудование для измерения объемной активности йода-131, один из радиационных факторов, по которому оценивается влияние АЭС на окружающую среду. Все известные радионуклиды йода имеют техногенное происхождение. При выбросах в атмосферу радионуклиды йода становятся критическим компонентом загрязнения внешней среды ввиду их высокой биологической активности и радиологической токсичности [3–7]. Самым опасным изотопом признан йод-131 ввиду длительного периода полураспада (8 сут) и высокого кумулятивного выхода. По принципу действия, оборудование непрерывного контроля йода основано на осаждении йодной составляющей путем сорбции на фильтрующие материалы с последующим измерением.

Анализ опыта эксплуатации прибора-прототипа БДАГ-05Р1 на энергоблоках №№ 1, 2 и 4 Калининской АЭС, ЗПУПД Белоярской АЭС, энергоблоках № 1 и 2 Нововоронежской АЭС-2 и ПАТЭС “Академик Ломоносов” выявил необходимость улучшения прежде всего конструкторских решений в части массогабаритных параметров: масса — 226 кг, диаметр — 300 мм, высота — 1000 мм, что создавало большие трудности с транспортировкой изделия и его монтаже на объектах. Более того, в ряде случаев это препятствовало размещению блока непосредственно в зоне отбора пробы, что требовалось согласно проектным решениям. Исходя из актуальных требований частных технических заданий на разработку АСРК АЭС “Руппур”, АЭС “Аккую”, АЭС “Эль-Дабаа” (сооружаемых по проекту “АЭС-2006”), Курской АЭС-2 (проект “ВВЭР-ТОИ”) и опыта эксплуатации блоков детектирования БДАГ-05Р1, был определен круг задач, подлежащих решению в рамках новой разработки. В их число вошли задачи уменьшения габаритных размеров и массы в 3–4 и 1,5–2 раза соответственно, сокращение числа механических деталей и узлов на 30% и расширение верхней грани-



Рис. 2. Внешний вид БДАГ-05Р1, масса — 226 кг, диаметр — 300 мм, высота — 300 мм.

цы диапазона измерений с $3.7 \cdot 10^6$ до $3.7 \cdot 10^7$ Бк/м³ (при сохранении достигнутого значения нижней границы на уровне $3.7 \cdot 10^{-2}$ Бк/м³) [21–23]. За счет принятых инженерных решений себестоимость производства устройства детектирования йода-131 должна была сократиться не менее чем на 15% по сравнению с затратами на изготовление БДАГ-05Р1.

В результате работы было создано устройство детектирования УДАГ-09Р. Для повышения эффективности улавливания радиоактивного йода был разработан и запатентован сорбционный картридж в форме сосуда Маринелли (ранее применялся картридж с углем в форме цилиндра). Узел детектора также подвергся модернизации и получил два исполнения на основе кристаллов NaI(Tl) и LaBr₃ (имеет большую эффективность регистрации гамма-излучения). Для подтверждения метрологических характеристик выполнены натурные испытания с осаждением йода-131 на сорбционные картриджи. Внешний вид УДАГ-09Р приведен на рис. 1. Одним из наиболее важных решений стало размещение узла детектирования йода-131, для исключения влияния внешнего гамма-фона на процесс измерения, в защите из сплава вольфрама (имеет больший по сравнению со свинцом коэффициент ослабления гамма-излучения за счет большего атомного номера при сопоставимой плотности материалов, кроме того механическая обработка деталей из свинца осложнена из-за повышенной текучести материала — вольфрам этим отрицательным свойством не обладает), что позволило существенно снизить габаритные размеры и массу по сравнению с блоком детектирования БДАГ-05Р1 (рис. 2). Все перечисленные материалы и комплектующие изделия доступны на российском рынке и выпускаются отечественными предприятиями.

Как показано выше, в результате работы масса оборудования снижена в 3.7 раз, габаритные размеры (по диаметру) – в два раза, что соответствует ожидаемому эффекту опытно-конструкторской работы. Проведенные параллельно с разработкой устройства детектирования УДАГ-09Р маркетинговые исследования показали, что более простые и дешевые решения по реализации данного типа оборудования на рынке отсутствуют, а патентный поиск подтвердил целесообразность оформления полезной модели, отличающейся от известных аналогов большей эффективностью регистрации гамма-излучения от йода-131 (благодаря выбору материалов детектора и элементов конструкции) и кратным снижением массы (благодаря замене материала защиты со свинца на детали из вольфрама и исключению второго измерительного тракта).

Примененные в устройстве детектирования УДАГ-09Р решения по выбору типа детектора, материала защиты, геометрии блока детектирования (включая картридж оригинальной конструкции), электронного тракта и т.д. позволили реализовать дополнительные функции по индикации объемной активности изотопов йода-132, 133, 135 и обеспечить отсутствие дополнительной погрешности в широком температурном диапазоне эксплуатации от минус 30 до 60°C (достигнутый ранее диапазон – от минус 10 до 55°C). Группа по электромагнитной совместимости была повышена с III до IV по ГОСТ 32137, назначенный срок службы увеличен с 15 до 20 лет.

В качестве основного критерия экономической эффективности реализованных инженерных решений было принято изменение себестоимости. Стоимость материалов и комплектующих изделий при серийном производстве устройств детектирования УДАГ-09Р возросла на 26% по сравнению с аналогичными затратами при изготовлении блоков детектирования БДАГ-05Р1 (детали из вольфрама дороже продукции из свинца). Трудоемкость изготовления сократилась не менее, чем на 47% (изделие стало более технологичным из-за меньшего количества деталей и выбору их конструкции, оптимизированной для изготовления на станках с ЧПУ). Таким образом, себестоимость оборудования снизилась на 18.6%.

Устройство детектирования объемной активности инертных радиоактивных газов

В настоящее время измерение объемной активности (ОА) инертных радиоактивных газов (ИРГ) на АС и объектах использования атомной энергии выполняется с использованием блоков и устройств детектирования, чувствительным элементом в которых являются полупроводниковые детекторы, сцинтилляционные детекторы или ионизационные камеры. Анализ показал, что наиболее оптималь-

ным соотношением “цена-измерительные характеристики” обладают блоки детектирования (БД) на основе сцинтиллятора. Однако для них характерна ограниченная верхняя граница диапазона измерений. Сравнительный анализ различных вариантов реализации БД для измерения ОА ИРГ приведен, например, в публикациях [24–26], и по сделанному выше выводу в настоящее время отмечается консенсус среди разработчиков и производителей аппаратуры радиационного контроля.

Часто для расширения диапазона измерений используют устройства детектирования (УД), имеющие в своем составе 2–3 БД, каждый из которых выполняет измерение в заданном поддиапазоне. Нами была поставлена задача обеспечить измерение ОА ИРГ в расширенном диапазоне, используя только один сцинтилляционный блок детектирования. Наличие в составе УД нескольких БД с ограниченным диапазоном измерений, каждый из которых требует отдельных программно-аппаратных средств для электропитания, первичной обработки сигналов, коммутации линий связи и магистралей отбора проб ИРГ, приводит к снижению надежности конечного изделия и неизбежно связано с практически кратным увеличением его цены (и стоимости его обслуживания, как следствие сложности конструкции) по сравнению с одноканальным вариантом.

Прототип данного устройства, блок детектирования БДГБ-40П (рис. 3), выполнен в виде цилиндрического корпуса с защитой из свинца (установка в вертикальном положении через отверстие в торце защиты). Масса изделия – 310 кг, габаритные размеры: 760 (диаметр) × 870 мм. Исходя из анализа проектных и нормативных требований (например, Стандарт организации АО “Концерн Росэнергоатом” “Системы радиационного контроля атомных электростанций. Общие требования”. СТО 1.1.1.04.001.1384-2017), диапазон измерений ОА ИРГ должен составлять от $1.0 \cdot 10^4$ до $1.0 \cdot 10^{12}$ Бк/м³. На этапе анализа существующих решений и выбора направления конструирования устройства были рассмотрены устройства детектирования – прототипы, представленные в табл. 1. Ни один из них в полной мере не соответствует комплексу требований, предъявляемых к оборудованию АСРК современных проектов АЭС с реакторными установками типа ВВЭР.

При разработке устройства были учтены выявленные конструкторские и эксплуатационные недостатки существующих приборов, к числу которых следует отнести: ограниченный диапазон измерений (смещенный в сторону низких активностей, либо характерный для эксплуатации в аварийных условиях с повышенным выходом ИРГ), повышенную погрешность в области низких энергий и в начале диапазона измерений,

ограниченный диапазон рабочих температур, отсутствие цифрового интерфейса связи блока детектирования со вторичной регистрирующей аппаратурой и пониженную радиационную стойкость детекторов при непрерывном воздействии больших доз гамма-излучения. Необходимо отметить, что достоинства, вытекающие из использования сцинтилляционного метода измерений ОА ИРГ в блоках детектирования БДГБ-40П (высокая эффективность регистрации бета-частиц, испускаемых ИРГ, отсутствие анизотропии детектора и естественная компенсация энергетической зависимости чувствительности, т.н. “хода с жесткостью”), при разработке нового прибора были в полной мере сохранены.

Основу конструкции разрабатываемого устройства составляет измерительная камера, в которой расположен сцинтилляционный детектор, непосредственно контактирующий с измеряемой газовой средой. Геометрия измерительной камеры представляет собой сосуд внутреннего наполнения с торцевым расположением ФЭУ и равномерным распределением сцинтилляционных пластин по объему камеры, что обеспечивает большую эффективную площадь детектора, и, как следствие, высокую эффективность регистрации бета-частиц, испускаемых инертными радиоактивными газами. Сцинтилляционные пластины выполнены из полистирола с добавлением 0.02% РОРОР и 2% р-терфенила [27–29].

Одним из ключевых вопросов при построении устройств аналогичного назначения является выбор оптимального материала и конструкции защиты измерительной части от воздействия фоновое гамма-излучения. Традиционно для этих целей применяется свинец, однако применение этого материала требует существенного усложнения конструкции в силу его пластичности, в частности требуется внешний корпус из нержавеющей стали, что в конечном счете, несмотря на относительно низкую стоимость самого свинца, приводит к значительному повышению трудоемкости изготовления, и, как следствие, к снижению технологичности процесса изготовления и удорожания стоимости прибора.

Физико-химические свойства вольфрама, наряду с распространенностью его запасов в природе и доступностью для заказа, позволяют рассматривать его в качестве альтернативы свинца при изго-



Рис. 3. Внешний вид БДГБ-40П, масса изделия – 310 кг, габаритные размеры: 760 (диаметр) × 870 мм.

товлении защит БД от внешнего гамма-излучения. Кроме того, в отличие от свинца, вольфрам не является токсичным элементом, и его утилизация не накладывает на пользователей дополнительных существенных затрат при утилизации оборудования на завершающей стадии жизненного цикла в соответствии с экологическими требованиями к компонентам “зеленой энергетики”. Также следует принимать во внимание тенденции развития более экономически эффективных технологий порошковой металлургии взамен литья и механической обработки металлических деталей, в объеме производства которых вольфрам занимает значительную долю.

Поэтому материалом для изготовления защиты в качестве оптимального варианта нами был выбран вольфрам (другие промышленно выпускаемые твердые, нетоксичные, нерадиоактивные, химически инертные и стабильные материалы, не считая не подлежащего свободному хозяйственному обороту обедненного урана, для изготовления радиационных защит БД не применяются). Выбор в пользу вольфрама относительно традиционного свинца был основан на уменьшении массы-габаритных характеристик. Исходя из опыта эксплуатации оборудования радиационного контроля на АС (кроме оборудования, предназначенного для измерений в условиях повышенного уровня гамма-излучения), максимально возможным проектным внешним гамма-фоном является

Таблица 1. Устройства детектирования ОА ИРГ – прототипы [27–29]

Организация	АО “СНИИП”	ООО НПП “Доза”	ФГУП “ПСЗ”	ООО НПП “Радико”
Устройство	БДГБ-40П	УДГ-1Б	УДГБ-02Е	УДГБ-204
Тип детектора	Пленочный сцинтиллятор	Кремниевый ППД	Счетчики Гейгера-Мюллера	Кремниевый ППД
Диапазон измерений, Бк/м ³	$1.0 \cdot 10^3 - 3.7 \cdot 10^7$	$1.0 \cdot 10^4 - 3.7 \cdot 10^{10}$	$2.5 \cdot 10^4 - 8 \cdot 10^{13}$	$1.0 \cdot 10^4 - 3.7 \cdot 10^{10}$



Рис. 4. Внешний вид УДГБ-47Р, масса 84 кг, диаметр – 228, высота – 505 мм.

1 мкГр/ч. Критерием расчета толщины был определен коэффициент ослабления внешнего гамма-излучения, обусловленного источником ^{137}Cs ($E = 662$ кэВ), в 500 раз. Таким образом, расчетная толщина защиты составила: $d = \frac{\ln 500}{\mu} = 3.4$ см, где μ – линейный коэффициент ослабления в вольфраме, 1.79 см^{-1} .

В результате проведенной НИОКР было разработано новое устройство детектирования УДГБ-47Р [21–23] на основе пластикового сцинтилляционного детектора (рис. 4), в котором материал защиты БД был заменен на сплав вольфрама, конструкция была переработана таким образом, чтобы блок детектирования устанавливался в защиту через вертикальный паз (данное решение позволяет размещать оборудование непосредственно в точке контроля на любой высотной отметке и на любом расстоянии от несущих конструкций, в том числе в технологических помещениях и установка с ограниченным рабочим объемом, снижая таким образом затраты на монтаж и плановое обслуживание). В результате, при сохранении всех экранирующих свойств защиты и значения чувствительности к ионизирующему излучению масса изделия была сокращена до 84 кг, габаритные размеры уменьшены до значений 228 (диаметр) $\times$ 505 мм. Реализованный и подтвержденный метрологическими испытаниями диапазон измерений (при выполнении требований по точности) составил от 10^3 до $3.7 \cdot 10^{11}$ Бк/м³, что для данного типа приборов на сегодня является лучшим значением и удовлетворяет нормативно-техническим требованиям. По сравнению с диапазоном измерений

БДГБ-40П расширена верхняя граница диапазона измерений с $3.7 \cdot 10^8$ до $3.7 \cdot 10^{11}$ Бк/м³ (при сохранении достигнутого значения нижней границы на уровне 10^3 Бк/м³).

Как показано выше, в результате работы масса оборудования снижена в 3.7 раз, габаритные размеры (по сумме измерений) – в 2.2 раза, что соответствует ожидаемому эффекту опытно-конструкторской работы.

Примененные в устройстве детектирования УДГБ-47Р решения по выбору типа детектора, материала защиты, геометрии блока детектирования, электронного тракта (встроенный узел обработки информации с цифровым интерфейсом) и т.д. позволили, помимо кратного сокращения масса-габаритных размеров, обеспечить широкий диапазон рабочих температур от минус 10 до 55°C (достигнутый ранее диапазон – от 0 до 50°C). Группа по электромагнитной совместимости была повышена с III до IV по ГОСТ 32137, назначенный срок службы – увеличен с 15 до 20 лет.

В качестве основного критерия экономической эффективности реализованных инженерных решений было принято изменение себестоимости. Трудоемкость изготовления устройств детектирования УДГБ-47Р по сравнению с аналогом (БДГБ-40П) сократилась в среднем на 12.4% (изделие стало более технологичным из-за применения деталей из вольфрама, изготавливаемых на специализированном предприятии по кооперации). Общая производственная себестоимость оборудования аналогичного назначения вследствие колебания цен на вольфрам сохраняется на постоянном уровне, но, по аналогии с рассмотренным выше УД ОА ИРГ, при конструировании разработчиками прибора были заложены предпосылки для ее снижения.

На примере УДГБ-47Р проиллюстрируем полученный экономический эффект. Исходное состояние, применение прибора-прототипа: устройство детектирования объемной активности инертных газов – 15 единиц на один энергоблок с реактором ВВЭР. Масса одного прибора 310 кг, время установки – 6 ч, себестоимость – 6.5 млн руб. за единицу продукции. Целевая задача – существенное сокращение времени монтажа прибора без использования грузоподъемных механизмов и снижение себестоимости на 30%. Результаты: разработан инновационный прибор с расширенным, конкурентным диапазоном измерения, улучшенными эксплуатационными характеристиками, в котором при сохранении физических свойств защиты масса уменьшена с 310 до 84 кг, а общие габариты сокращены в 2 раза. Проведенные испытания показали, что время монтажа нового изделия составляет не более 2 ч, без применения специального такелажного оборудования, т.е. время монтажа удалось сократить в 3 раза. По состоянию на декабрь 2022 г.

Таблица 2. Устройства детектирования ОА жидких сред – прототипы [27–29]

Организация	АО “СНИИП”	ООО НПП “Доза”	ФГУП “ПСЗ”	ООО НПП “Радио”
Устройство	УДЖГ-35Р	УДГП-01	УДЖГ-22Е	УДЖГ-211
Тип детектора	Пластиковый сцинтиллятор	Сцинтиллятор	Сцинтиллятор NaI	Сцинтиллятор
Диапазон измерений, Бк/м ³	$1.0 \cdot 10^3 - 3.7 \cdot 10^7$	$4.0 \cdot 10^2 - 3.7 \cdot 10^8$	$2.5 \cdot 10^3 - 2.5 \cdot 10^6$	$1.0 \cdot 10^3 - 3.7 \cdot 10^8$

себестоимость изделия составила 4.3 млн руб., оценочная экономия – 33 млн руб. рублей на каждой поставке.

Устройство детектирования объемной активности жидких сред

Измерения объемной активности (ОА) жидких сред на АС и объектах использования атомной энергии, как и рассмотренные выше измерения радиоактивного йода-131 и ИРГ составляют основу контроля текущей радиационной обстановки [3–7], сюда также относится контроль радиоактивных аэрозолей, но в настоящей статье в силу ограниченности ее объема данные устройства не рассматриваются. Как и при построении УД объемной активности ИРГ, для устройств детектирования ОА жидких сред требуется расширение диапазона измерений, который должен составлять от $1.0 \cdot 10^3$ до $1.0 \cdot 10^{12}$ Бк/м³.

На этапе выбора направления конструирования устройства были рассмотрены изделия-прототипы, представленные в табл. 2. С учетом сходных экономических условий в сегменте оборудования АСРК, к новой продукции предъявлялись требования, аналогичные требованиям к УД ОА ИРГ и йода-131, рассмотренным выше. Необходимость новой разработки обусловлена отсутствием на рынке УД ОА жидких сред с ожидаемыми заказчиками эксплуатационными характеристиками, удовлетворяющих при этом проектным требованиям по метрологии и устойчивости к внешним воздействиям.

Сравнительный анализ прототипов проводился по критериям измерительных характеристик, конструкторско-технологической сложности и эксплуатационным характеристикам, среди которых мы сделали акцент на сложность/простоту/удобство монтажа изделия на объекте при не превышении достигнутого ранее размера материальных затрат и трудоемкости изготовления. Как правило, исходя из многолетнего опыта, разработка приборов подобного назначения начинается с “физики”, т.е. с выбора детектора, наиболее оптимально подходящего для решения измерительной задачи. В данном случае речь шла о выборе детектора, позволяющего обеспечить регистрацию излучения контролируемой жидкой среды в заданном диапазоне от $1.0 \cdot 10^3$ до $1.0 \cdot 10^{12}$ Бк/м³.

Исходя из опыта ранее проведенных разработок [24, 25], нами в качестве детектора был выбран пластиковый сцинтиллятор цилиндрической формы с габаритами $\varnothing 55 \times 200$ мм. Этот сцинтиллятор использовался в предыдущей модели УД и по совокупности параметров чувствительности и долговременного сохранения физических свойств выбран и для использования в новой разработке. Детектор выполнен из полистирола с добавлением 0.02% РОРОР и 2% р-терфина. Как уже отмечалось выше, существенным для конструкции прибора и его технологичности является материал защиты от внешнего гамма-фона. После проведения сравнительных оценок по критериям: степень ослабления гамма-фона/масштабные характеристики/технологичность/стоимость изготовления/удобство сборки, разборки, транспортирования и установки на объекте, в качестве материала защиты был выбран сплав сурьмы и свинца (добавки сурьмы снижают текучесть металла при механической обработке и перемещениях). По предварительной оценке, подтвержденной впоследствии при изготовлении опытного образца, трудоемкость изготовления снизилась на величину около 4%, материальные затраты остались на целевом уровне (около 40% от общей производственной себестоимости).

В результате, используя устройство УДЖГ-35Р в качестве прототипа (рис. 5), разработано новое устройство детектирования УДЖГ-43Р (рис. 6), в котором вместо традиционного свинца в качестве материала защиты БД был применен сплав свинца и сурьмы. Это решение позволило создать вариант сборно-разборной секционной защиты (рис. 7), монтаж которой может выполняться персоналом на любой высотной отметке без использования грузоподъемных механизмов: вся защита весом около 450 кг разделена на 60 сегментов массой не более 15 кг. Таким образом обеспечивается удобство эксплуатации на АС, а геометрия измерений и эффективность регистрации излучения с ослаблением влияния внешнего фона сохраняются на требуемом уровне. В данном случае удобство эксплуатации и связанные с ней затраты на монтаж, техническое обслуживание и ремонт, является основным критерием эффективности внедрения новых УД ОА жидких сред. В случае применения сборно-разборной секционной защиты достигается сокращение времени подготовки



Рис. 5. Внешний вид УДЖГ-35Р.



Рис. 6. Внешний вид УДЖГ-43Р.

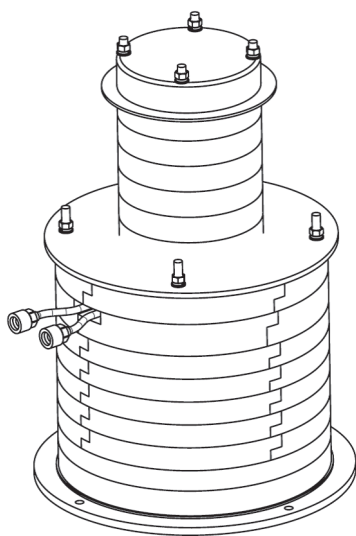


Рис. 7. Внешний вид секционной защиты.

оборудования к использованию с 8 до 2 ч, т.е. в четыре раза по сравнению с вариантом, основанном на применении неразборной защиты.

Сходство диапазонов измерений УДЖГ-43Р с защитой из свинца и рассмотренного выше УД ОА ИРГ УДГБ-47Р с защитой из вольфрама, составляющих для обоих устройств детектирования около девяти десятичных порядков, не должно вводить в заблуждение, так как объемы измерительных камер этих устройств значительно отличаются, составляя 1 л для УДГБ-47Р и 9.8 л для УДЖГ-43Р. Стоимость защиты из вольфрама с внутренним объемом 9.8 л, необходимым для реализации заданной проектом АСРК геометрии измерений, экономически нецелесообразно из-за многократного увеличения материальных затрат.

Применение секционной защиты позволило упростить транспортирование изделия, и, что очень важно, значительно сократить трудоемкость монтажа на объекте — монтаж может выполняться персоналом на любой высотной отметке без использования грузоподъемных механизмов: вся защита весом около 450 кг разделена на 60 сегментов массой не более 15 кг. Таким образом обеспечивается удобство эксплуатации на АС, а геометрия измерений и эффективность регистрации излучения с ослаблением влияния внешнего фона сохраняются на требуемом уровне.

ОБОБЩЕНИЕ ПОДХОДА

В результате выполнения НИОКР разработаны и освоены в серийном производстве приборы нового поколения, созданные на основе оптимизированных решений в части материалов радиационной защиты, оптимизации конструкций приборов и их основных компонентов, применения цифровых технологий. Влияние последнего из перечисленных инструментов на технико-экономические характеристики изделий ядерного приборостроения заслуживает рассмотрения в отдельной публикации, ниже ограничимся перечислением ключевых функциональных задач, связанных с ним. На этапе разработки схем электрических принципиальных и схем соединений, топологии электронных печатных плат, конструкторской документации на детали, узлы и сборочные единицы, входящие в состав приборов, используются специализированные программные пакеты и системы автоматизированного проектирования (САПР). Соответствующие САПР применяются также для моделирования механических и температурных нагрузок на элементы конструкции оборудования и для исследования в динамике поведения контролируемых сред в пределах измерительного объема сложной формы. Для расчетной оценки чувствительности блоков детектирования к ионизирующим излучениям с различными вариантами исполнения защит и геометрии измере-

ний и предварительного (до изготовления опытных образцов, что позволяет избежать изготовления многочисленных промежуточных макетов) подтверждения диапазонов и точности измерений, при разработке конструкции приборов используются программные средства математического моделирования, основанные главным образом на статистических методах. В ряде случаев вместо проведения испытаний опытных образцов на устойчивость к вибрациям и сейсмическим воздействиям данные испытания проводятся расчетными методами с помощью аттестованных программных продуктов. Разработка встраиваемого и прикладного программного обеспечения измерительных каналов АСРК выполняется с широким использованием программных имитаторов, внутрисхемных эмуляторов, средств программирования на языках высокого уровня и других САПР.

Переход к серийному производству согласно действующим нормативно-техническим требованиям осуществляется после достижения высокого уровня технологической готовности продуктов, что подтверждается результатами испытаний и оценок соответствия в других формах (сертификация, экспертиза документации, оформление решений о применении импортных комплектующих изделий и пр.). На этапе, предшествующем постановке на производство, по каждому разрабатываемому типу продукции отдельно проводится суммирование затрат, связанных с разработкой документации, изготовлением макетов и опытных образцов и процедурами оценки соответствия. Плановые и фактические калькуляции стоимости в дальнейшем используются для оценки экономической эффективности создаваемых продуктов так, как будет показано далее.

Для измерения инертных радиоактивных газов, разработано новое устройство детектирования УДГБ-47Р, которое при обеспечении требуемого диапазона измерений от 10^3 до 10^{12} Бк/м³ в жестких условиях эксплуатации имеет массу в 3.5 раза меньшую относительно прототипа при существенном сокращении габаритных размеров. Аналогичные конструкторские решения реализованы и при разработке устройства детектирования объемной активности йода-131, где полученные результаты еще более впечатляющие: масса нового устройства детектирования УДАГ-09Р была сокращена с 226 до 61 кг, а габаритные размеры по сумме измерений — более чем в 2 раза, при расширении диапазона измерений в чувствительной области на 30% и увеличение диапазона в верхней части в 2.7 раза, что в единицах измерения составило от $3.0 \cdot 10^{-2}$ до $1.0 \cdot 10^7$ Бк/м³. При разработке нового устройства детектирования УДЖГ-43Р среди принятых инновационных решений существенное место занимает переход от традиционного свинца в качестве материала защиты блока

детектирования к сплаву свинца и сурьмы (добавки сурьмы снижают текучесть металла при механической обработке и перемещениях). Это решение потребовало проведения отдельного технологического исследования, результатом которого стало найденное оптимальное соотношение свинца и сурьмы (относительно аналогичных изделий других предприятий), что позволило не только создать вариант сборно-разборной секционной защиты, но и найти решения, существенно упростившие конструкцию прибора и повысившие уровень технологичности его изготовления.

Отдавая себе отчет в том, что разработка новой техники является творческим процессом интеллектуальной деятельности, и обобщая вышеизложенное, предлагается следующая последовательность инженерных и экономических мероприятий, направленная на обеспечение конкурентоспособности разрабатываемой продукции, в виде цикла Деминга.

На первом этапе “Планирование” проводится сравнительный конкурентный анализ представленных на рынке и выпускаемых предприятием разработчиком типов оборудования, выполняется качественная и количественная оценка технических характеристик и цен на продукцию, в том числе зарубежного производства. Далее проводится трассировка контрактных требований перспективных проектов сооружения АС, лежащих в основе технического задания на разработку новых продуктов. Объектом инженерно-экономической оптимизации являются, в первую очередь, те типы оборудования, которые имеют наибольший потенциал коммерциализации (обеспечение максимальной рентабельности и при поставках, получение необходимой выручки от реализации в объеме портфеля заказов). Для каждого типа оборудования определяется лимитная себестоимость, связанная с ценой продаж через систему утверждаемых плановых экономических показателей (проценты накладных расходов и прибыли, стоимость нормо-часа и т.д.). Определяются и оцениваются конкурентные преимущества новых продуктов, исходя из их технических характеристик и цены. Себестоимость рассматривается как величина, суммирующая трудоемкость производства (сумма расходов на оплату труда) и материальные затраты (включая работы и услуги, выполняемые сторонними организациями). Соотношение между составляющими себестоимости определяется экспертным способом на основе изделий-аналогов. Непревышение лимитной себестоимости является критерием экономической эффективности продуктов проекта. В ряде случаев, себестоимость определяется суммарно для нескольких типов оборудования, вместе образующих законченный измерительный канал АСРК (критерий “цена за канал” лежит в основе финансово-эко-

номических моделей инвестиционных проектов, реализуемых в форме НИОКР).

На втором этапе “Действие” командой проекта в формате “мозгового штурма” вырабатывается концепция реализации нового прибора с лимитной себестоимостью, соответствующего техническому заданию: из перечня доступных вариантов выбираются тип детектора, основные электронные компоненты измерительного тракта, форм-фактор (объемы измерительных камер, площади детекторов, необходимые коэффициенты ослабления внешнего радиационного фона и т.п. параметры определяются расчетными способами с использованием САПР), модель корпуса, материал и толщина защит, тип интерфейса связи с верхним уровнем интеграции и другие значимые решения, оценивается их стоимость и возможность производства на базе предприятия-разработчика и по кооперации. Варианты, приводящие к значительному (более 20%) превышению лимитной себестоимости, отклоняются или дорабатываются. Разработчики стремятся найти баланс между технической сложностью и стоимостью реализации конечной аппаратуры. Проводятся патентные исследования, унификация и типизация технических решений по всей линейке выпускаемой, модернизируемой и вновь разрабатываемой продукции, в ходе которой в том числе решается задача сокращения числа уникальных материалов и комплектующих изделий. Затем, в соответствии с принятой концепцией, выполняется разработка рабочей конструкторской документации, по которой проводится технологическая подготовка производства с формированием плановой калькуляции стоимости изготовления опытных образцов с применением методов нормирования трудоемкости производственных операций. Изготавливаются опытные образцы, формируется информация о фактической себестоимости (в процессе изготовления периодически осуществляется экспресс-анализ структуры цены и бюджета проекта НИОКР).

На третьем этапе “Проверка” проводятся испытания опытных образцов, в ходе которых подтверждается достижение заявленных технических характеристик, при необходимости выполняется доработка и испытания проводятся повторно. Параллельно выполняется план-факт анализ калькуляций производственной себестоимости. Проводится факторный анализ отмеченных отклонений фактических значений трудоемкости изготовления и материальных затрат от плановых значений. В случае превышения затрат по отдельным позициям на величину более 20%, не связанного с доработкой опытных образцов, в плановую калькуляцию вносятся изменения и составляется план компенсирующих мероприятий, направленных на сокращение затрат. Такими мероприятиями с учетом результатов испытаний могут являться: замена марок материалов и комплектующих изделий

на более дешевые аналоги, отвечающие требованиям конструкторской документации; изменение отдельных технических требований к деталям и сборочным единицам; измерение содержания и последовательности отдельных технологических операций (механических и сборочных); переработка схемотехнических решений; изменение конструкции корпусов, защит и коммутационных элементов; прямая замена отдельных компонентов собственного производства на стандартные общепромышленные изделия с приемлемыми характеристиками, либо обратная замена дорогостоящих материалов и комплектующих изделий (отечественного и иностранного производства) на эквиваленты, изготавливаемые собственными силами; изменение технологии изготовления наиболее трудоемких деталей (например, замена литья на сварку); другие решения, основанные на опыте разработчиков и конструкторов. Перечисленные мероприятия выполняются с использованием САПР и обязательным документальным оформлением результатов. Осуществляются оценки соответствия в других формах, которые позволяют дополнительно верифицировать правильность принятых технических решений.

На четвертом этапе “Корректировка”, после прохождения точки принятия решения о продолжении реализации проекта (принимая во внимание, в том числе, экономические и организационные факторы) по актуальной конструкторской документации разрабатывается технологический процесс серийного изготовления оборудования, на основании которого составляется актуализированная плановая калькуляция. Благодаря конструкторско-технологической подготовке производства уточняются данные по трудоемкости и материальным затратам, которые снижаются при распределении ресурсов между несколькими изделиями одного типа и далее — между всей номенклатурой оборудования АСРК. Вместе с этим, в рамках НИОКР, идентифицируются организационные, технические, проектные и иные риски, оказывающие влияние на себестоимость продукции, и проводятся корректирующие действия (например, подбор эквивалентных замен дефицитных комплектующих изделий, создание страховых запасов, размещение части работ по кооперации на предприятии с меньшей нормой прибыли и т.д.). На следующем шаге изготавливается “пилотная” партия (или представительский комплекс) продукции, по результатам сдачи-приемки которой становятся доступны сведения о фактической производственной себестоимости, отклонения которой от плановых значений определяются качеством планирования и эффективности работы предприятия. Эти сведения сопоставляются со значениями лимитной себестоимости, зафиксированной на первом этапе, и делаются выводы об экономической эффективности проекта НИОКР.

Дополнительно оцениваются (на основе предыдущего опыта) затраты на монтаж и наладку оборудования на объекте, плановые значения которых рассчитываются по сметам. Затраты по вводу в действие и последующие затраты на ремонт и техническое обслуживание продукции на месте эксплуатации учитываются в общей калькуляции в соответствии с учетной политикой предприятия-поставщика.

Управление конфигурацией продукции по совокупности экономических и инженерных данных таким образом является сквозным процессом на протяжении всего периода реализации проекта НИОКР.

В качестве путей дальнейшего снижения трудоемкости изготовления и сокращения себестоимости производства оборудования АСРК нами рассматриваются: сокращение габаритов защит благодаря уменьшению линейных размеров блоков детектирования за счет перевода электронных узлов с изготовления по технологии печатных плат интегральные/гибридные технологии и использования миниатюрной электронной компонентной базы; оптимизация конструкций защит; применение компенсационных детекторов наряду с защитами; замена в ряде блоков детектирования первичных измерительных преобразователей со сцинтилляционных детекторов на газоразрядные счетчики с улучшенными метрологическими и эксплуатационными характеристиками; внедрение в технологический процесс производства деталей сложной формы аддитивных технологий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования выработан подход по применению инженерно-экономического анализа к разработке продукции радиационного контроля для объектов использования атомной энергии, включающий четыре этапа и показывающий особенности выбора решений для конкретных типов приборов, исходя из проектных условий их эксплуатации и оптимальных соотношений основных характеристик изделий.

Эти особенности находятся в прямой зависимости от технической сложности оборудования и себестоимости его производства как товарной продукции, в связи с чем требуется поиск оптимальных конструкторских решений, обеспечивающих не превышение лимитированных материальных затрат и трудоемкости изготовления при серийном выпуске. Периодический мониторинг затрат, детализированный план-факт анализ и компенсирующие мероприятия по управлению конфигурацией разрабатываемых изделий позволяют обеспечить экономическую эффективность проектов НИОКР в условиях быстро изменяющихся условий на рынке ядерного приборострое-

ния. Основная роль, тем не менее, принадлежит инженерам-разработчикам и конструкторам приборов, от опыта и уровня квалификации которых в первую очередь зависит конкурентоспособность продукции на всем жизненном цикле.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Федеральный закон № 170-ФЗ “Об использовании атомной энергии”.
2. Федеральный закон № 3-ФЗ “О радиационной безопасности населения”.
3. ОПБ-88/97. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций, ПНАЭГ-01-011-97. 1997. Москва: Госатомнадзор РФ.
4. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99). СП 2.6.1. 799-99. 2000. Минздрав РФ.
5. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) Сан ПиН 2.6.1. 2523-09.
6. Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций СП АС-03. САНПИН 2.6.1.24-03. 2003. Москва: Минздрав РФ.
7. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. НП-001-15.
8. Руководство по мониторингу при ядерных и радиационных авариях. IAEA – TECDOC – 1092/R. 2002. Вена: МАГАТЭ.
9. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards/GSR-3. 2014. Vienna: IAEA.
10. Оборудование для постоянного контроля радиоактивности в газообразных выбросах. Специальные требования к устройствам, измеряющим содержание радиоактивных благородных газов в газообразных выбросах. 2002. МЭК 60761-3.
11. Стандарт МЭК 61513. Атомные электростанции. Системы контроля и управления, важные для безопасности. 2001. Москва: “ИЗИНТЕХ”.
12. Стандарт МЭК 61504. Атомные электростанции. Системы контроля и управления, важные для безопасности. Системы радиационного контроля. 2001. Москва: “ИЗИНТЕХ”.
13. Безопасность атомных станций: Справочник. 2000. Москва: Росэнергоатом.
14. Мансуров О.А., Крупнова А.П., Птицын П.Б. Международные практики и методы управления НИОКР и инновациями в крупных зарубежных наукоемких корпорациях и органах государственного управления в области использования атомной энергии. Аналитический отчет. 2020. Москва: ЦИАР, ЧУ “Наука и инновации”. Рус. Деп. 18.05.20, № 29-B2020.
15. Кутьков В.А., Поленов Б.В., Черкашин В.А. Радиационная безопасность и радиационный контроль. Т. 1. 2008. Обнинск: НОУ “ЦИПК”. С. 222–236.
16. Кутьков В.А., Поленов Б.В., Черкашин В.А. Радиационная безопасность и радиационный контроль. Т. 2. 2008. Обнинск: НОУ “ЦИПК”. С. 81–97.

17. Кутьков В.А., Поленов Б.В., Черкашин В.А. Радиационная безопасность и радиационный контроль. Т. 2. 2008. Обнинск: НОУ “ЦИПК”. С. 128–144.
18. Кутьков В.А., Поленов Б.В., Черкашин В.А. Радиационная безопасность и радиационный контроль. Т. 2. 2008. Обнинск: НОУ “ЦИПК”. С. 208–236.
19. Knoll G.F. Radiation Detection and Measurements. 3rd Ed. 2000. New York: Wiley.
20. Nakhostin, Mohammad. Signal Processing for Radiation Detectors. Description. 2018. Hoboken: Wiley.
21. Ветошкин Е.М., Гордеев А.С., Иванов А.А., Калинин А.В., Насибуллин Р.А., Чебышов С.Б., Черкашин И.И. // Ядерн. физ. инжинир. 2022. Т. 13 (6). С. 531–534 [Vetoshkin E.M., Gordeev A.S., Ivanov A.A., Chebyshov S.B., Cherkashin I.I. // Phys. At. Nucl. 2022. V. 85 (9). P. 1459–1461].
22. Erofeev P.N., Ivanov A.A., Kuz'mina O.S., Cherkashin I.I., Shevtsov S.V. // At. Energy. 2018. V. 125 (1). P. 55–60.
23. Кушев В.А., Иванов А.А., Ветошкин Е.М., Чебышов С.Б. Реализация программно-аппаратного обеспечения непрерывного радиационного контроля газоаэрозольных сред. Физико-технические интеллектуальные системы (ФТИС-2022). Сб. тр. научно-практ. конф. Москва, 08–10 фев. 2022. С. 229–232.
24. Гордеев А.С., Горн Л.С., Комиссаров А.Б. // Ядерные измерительно-информационные технологии № 3 (23). 2007. Москва: СНИИП. С. 61–71.
25. Гордеев А.С., Денисов Д.В., Комиссаров А.Б., Кудинович А.С. // Ядерные измерительно-информационные технологии № 4 (20). 2006. Москва: СНИИП. С. 64–73.
26. Гордеев А.С., Горн Л.С., Мысев И.П. // Ядерные измерительно-информационные технологии. № 2 (26). 2008. Москва: СНИИП. С. 55–69.
27. Рекламно-каталожная информация АО “СНИИП”. 2022.
28. Рекламно-каталожная информация MGP INSTRUMENTS. 2021.
29. Рекламно-каталожная информация НПП “Доза”. 2022.

Engineering-Economic Approach to Innovative Development of Nuclear Instrumentation Products

D. Yu. Baidarov¹, D. Yu. Faikov², S. B. Chebyshov³, *, A. S. Gordeev³, A. A. Ivanov³, and A. V. Kalin³

¹ State Atomic Energy Corporation Rosatom, Moscow, 119017 Russia

² Russian Federal Nuclear Center All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics,
Sarov, Nizhegorodskaya oblast, 607188 Russia

³ Specialized Scientific Research Institute of Instrumentation, Moscow, 123060 Russia

*e-mail: SBoChebyshov@sniip.ru

Received May 29, 2024; revised May 29, 2024; accepted June 10, 2024

Abstract—Innovative engineering solutions for several types of radiation monitoring equipment have been presented to illustrate a complex engineering economical approach to the development of new products. The issue of designing new instruments is being considered, taking into account the operating experience of prototype devices.

Keywords: radiation monitoring, external background protection, design and technological solutions