



СНИИП
РОСАТОМ

Применение инженерно-экономического подхода при конструировании элементов систем радиационного контроля

*Доклад на III Научно-практической конференции
«Физико-технические интеллектуальные системы» (ФТИС-2024)
06-08.02.2024, г. Москва, НИЯУ МИФИ*

Чебышов С.Б., Гордеев А.С., Иванов А.А., Калинин А.В. – АО «СНИИП»;
Байдаров Д.Ю. – Госкорпорация «Росатом»;
Файков Д.Ю. – ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ».

Цель доклада



Создание новых типов оборудования радиационного контроля, обладающих лучшими технико-экономическими показателями, является актуальной задачей. При традиционных подходах к созданию новой техники преобладает применение инновационных решений в фокусе достижения **улучшенных (рекордных) технических характеристик** – прежде всего, диапазона и точности измерений. 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 АО «СНИИП» работа по совершенствованию продуктовой линейки гражданского назначения (ОКР «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 измерительных характеристик, но одновременно на каждом этапе разработки анализируется «цена» того или иного решения.

На примере разработки нескольких типов ПТС радиационного контроля **проиллюстрировано принятие решений** на основании и **инженерного, и экономического анализа.**

Направления работ



В перечень контролируемых параметров **АСРК**, предназначенных для **радиационного контроля** эффективности защитных барьеров энергоблока АЭС, состояния технологического оборудования, оценки безопасной эксплуатации ЯЭУ по уровням допустимого воздействия на персонал, население и окружающую среду на промышленной площадке, в СЗЗ и ЗН объекта, в обязательном порядке входят измерения объемной активности радиоактивных аэрозолей, йода-131, инертных радиоактивных газов, паровоздушных и жидких сред.

Современным приборам свойственны **наращивание функций**, сокращение времени обработки информации, повышение точности измерений и устойчивости к внешним воздействующим факторам, включая уровень внешнего радиационного фона, требование селективности регистрации заданного вида излучения. **Объективно, это приводит к существенному усложнению приборов, объем оборудования АСРК за последние 15 – 20 лет увеличился, по разным оценкам, до 10 раз, при соответствующем росте цен на это оборудование.**

Созданные в рамках *ОКР «Кайман»* новые типы приборов стали основой построения АСРК в реализуемых проектах строительства энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР-1200. Из **250 – 300 измерительных каналов** современной АСРК **до 80%** строится на вновь разрабатываемом оборудовании.

Постановка задачи



При выборе стратегии выполнения *ОКР «Кайман»*, наряду с достижением требуемых технических параметров, таких как точность и диапазоны измерений, повышение интеллектуальности новых приборов и пр., **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 стало создание таких конструкций приборов, позволяют без строительных доработок устанавливать новое оборудование вместо заменяемого при модернизации действующих энергоблоков.

Таким образом, была поставлена комплексная **задача – достижение конкурентных технических характеристик при одновременном снижении стоимости производства**. Параметры технической конкурентоспособности: метрологические и эксплуатационные характеристики (надежность, диапазон и точность измерений, габаритные размеры и масса оборудования, диапазон регистрируемых энергий, дополнительная погрешность, универсальность внешних интерфейсов, ремонтпригодность, самодиагностика и другие показатели назначения).

Методология решения задачи



Тенденции к усложнению аппаратуры привели, с одной стороны, к улучшению технических характеристик приборов, но и обусловили **противоречия** в способах комплексного улучшения их качества, приводя к удорожанию, снижению надежности, трудностям при монтаже оборудования на объекте, затруднению их эксплуатации. **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 требований, предъявляемых к любому изделию, является его **надежность**. С усложнением прибора, существенно возрастает риск получения такого продукта, применение которого для решения целевой задачи станет нецелесообразным.

В рамках *ОКР «Кайман»* были сформулированы, 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 **основная задача** по выработке подходов по преодолению противоречий, указанных выше, и выбор способов реализации конкретных типов приборов, **решаются исходя из проектных условий эксплуатации, оптимальных соотношений основных характеристик изделий.**

Разработка устройства детектирования объемной активности йода-131



В объём радиационного контроля АСРК любой АЭС входит оборудование для измерения объёмной активности йода-131, один из радиационных факторов, по которому оценивается влияние АЭС на окружающую среду.

Анализ опыта эксплуатации 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, а в ряде случаев препятствовало размещению оборудования непосредственно в зоне отбора пробы согласно проектным решениям. Исходя из актуальных требований к АСРК по проектам «АЭС-2006» и «ВВЭР-ТОИ» и опыта эксплуатации блоков детектирования БДАГ-05Р1, был **определён круг задач**, подлежащих решению в рамках новой разработки, в их число вошли: уменьшение габаритных размеров и массы в 3-4 и 1,5-2 раза соответственно; сокращение числа механических деталей и узлов на 30%; расширение верхней границы 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).

За счет принятых инженерных решений **себестоимость** производства устройств детектирования йода-131 **должна была сократиться не менее чем на 15%** по сравнению с затратами на изготовление БДАГ-05Р1.

Разработка устройства детектирования объемной активности йода-131 (продолжение)



В рамках ОКР «Кайман» 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 2 исполнения на основе кристаллов NaI(Tl) и LaBr_3 . 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**, что позволило существенно снизить габаритные размеры и массу по сравнению с блоком детектирования БДАГ-05Р1.



Внешний вид БДАГ-05Р1, масса – 226 кг, диаметр – 300 мм, высота – 300 мм



Внешний вид УДАГ-09Р, масса – 61 кг, диаметр – 150 мм, линейный размер – 300 мм

Разработка устройства детектирования объемной активности йода-131 (окончание)



Масса оборудования **снижена в 3,7 раз, габаритные размеры** (по диаметру) – **в 2 раза**. По сравнению с известными аналогами УДАГ-09Р обладает большей эффективностью регистрации гамма-излучения (благодаря выбору материалов детектора и элементов конструкции) и **кратно сниженной массой** (благодаря замене материала защиты со свинца на детали из вольфрама и исключению второго измерительного тракта).

Примененные в 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 изотопов йода-132, 133, 135 и обеспечить отсутствие дополнительной погрешности **в широком температурном диапазоне** от - 30 до 60 °С (ранее: от - 10 до 55 °С). **Группа по ЭМС** была повышена с III до IV по ГОСТ 32137, назначенный **срок службы** – увеличен с 15 до 20 лет.

Стоимость материалов и комплектующих изделий при серийном производстве устройств детектирования УДАГ-09Р возросла на 26% по сравнению с БДАГ-05Р1. Трудоемкость изготовления сократилась не менее, чем на 47% (меньшее количество деталей и выбор их конструкции, оптимизированной для станков с ЧПУ). **Себестоимость оборудования снизилась на 18,6%.**

Разработка устройства детектирования объемной активности инертных радиоактивных газов



Наиболее оптимальным соотношением «цена-измерительные характеристики» для применения в АСРК обладают **сцинтилляционные** приборы, для которых характерна **ограниченная верхняя граница диапазона измерений** объемной активности. Для расширения диапазона измерений используют УД, имеющие в своем составе 2-3 БД, каждый из которых выполняет измерение в заданном поддиапазоне. В рамках *ОКР «Кайман»* была поставлена задача обеспечить измерение **в расширенном диапазоне**, используя 1 БД. Наличие в составе УД нескольких БД, каждый из которых требует отдельных ПТС 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 по сравнению с 1-канальным вариантом.

Прототип – БДГБ-40П, выполнен в виде цилиндрического корпуса с защитой из свинца (установка БД в вертикальном положении через отверстие в торце), масса изделия – 310 кг, габаритные размеры: 760 (диаметр) x 870 мм. Диапазон измерений 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 были рассмотрены доступные аналоги, в полной мере не соответствующие требованиям, предъявляемым к современным АЭС с ВВЭР.

Разработка устройства детектирования объемной активности радиоактивных газов (продолжение)



При разработке нового оборудования были учтены выявленные конструкторские и эксплуатационные **недостатки существующих приборов**, к числу которых следует отнести: ограниченный диапазон измерений, повышенную погрешность в области низких энергий и в начале диапазона измерений, ограниченный диапазон рабочих температур и пониженную радиационную стойкость детекторов при непрерывном воздействии больших доз гамма-излучения. **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**.

Организация-производитель	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	$1,0 \cdot 10^3$ ÷ $3,7 \cdot 10^7$	$1,0 \cdot 10^4$ ÷ $3,7 \cdot 10^{10}$	$2,5 \cdot 10^4$ ÷ $8 \cdot 10^{13}$	$1,0 \cdot 10^4$ ÷ $3,7 \cdot 10^{10}$

Разработка устройства детектирования объемной активности радиоактивных газов (продолжение)



В рамках ОКР «Кайман» было создано устройство детектирования **УДГБ-47Р**.

Основу конструкции составляет измерительная камера (ИК), в которой расположен **сцинтилляционный детектор**, непосредственно контактирующий с измеряемой газовой средой. **Геометрия** ИК представляет собой сосуд внутреннего наполнения с торцевым расположением ФЭУ и равномерным распределением сцинтилляционных пластин по объёму, что обеспечивает большую эффективную площадь детектора, и, как следствие, высокую эффективность регистрации. Сцинтилляционные пластины выполнены из **полистирола** с добавлением 0,02% РОРОР и 2% р-терфинала. Материал защиты БД был заменен на сплав **вольфрама**.



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



Внешний вид блока детектирования из состава УДГБ-47Р, масса 84 кг, диаметр – 228, высота – 505 мм.

Критерием расчета толщины защиты был определен коэффициент ослабления внешнего гамма-излучения, обусловленного источником Cs^{137} ($E=662$ кэВ), в 500 раз. Таким образом, расчетная толщина защиты составила: $d = \ln 500 / \mu = 3,4$ см, где μ – линейный коэффициент ослабления в вольфраме, $1,79 \text{ см}^{-1}$.

Разработка устройства детектирования объемной активности радиоактивных газов (окончание)



Масса прибора, при сохранении всех экранирующих свойств защиты и значения чувствительности к ионизирующему излучению, **сокращена** до 84 кг (в 3,7 раза), **габаритные размеры уменьшены** до значений 228 (диаметр) x 505 мм (в 2,2 раза по сумме измерений). Конструкция переработана таким образом, чтобы БД устанавливался в защиту через вертикальный паз (это позволяет размещать оборудование непосредственно в точке контроля на любой высотной отметке и на любом расстоянии от несущих конструкций, снижая таким образом затраты на монтаж и плановое обслуживание).

Диапазон измерений составил от 10^3 до $3,7 \cdot 10^{11}$ Бк/м³ (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). Примененные в УДГБ-47Р решения по выбору типа детектора, материала защиты, геометрии ИК, 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 -10 до 55 °С (ранее: от 0 до 50 °С). **Группа по ЭМС** была повышена с III до IV по ГОСТ 32137, назначенный **срок службы** – увеличен с 15 до 20 лет. **Трудоемкость** изготовления УДГБ-47Р **сократилась в среднем на 12,4%** (детали из вольфрама изготавливаются по кооперации).

Разработка устройства детектирования объемной активности жидких сред



Измерения объемной активности жидких сред, как и измерения радиоактивных аэрозолей, йода-131 и ИРГ, составляют основу контроля текущей радиационной обстановки в АСРК. Для УД объемной активности 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 в рамках ОКР «Кайман» были рассмотрены **изделия-прототипы**. С учетом сходных экономических условий в сегменте оборудования АСРК, к новой продукции предъявлялись требования, аналогичные требованиям к УД ИРГ и йода-131, рассмотренным ранее.

Необходимость новой разработки обусловлена отсутствием на рынке УД жидких сред с ожидаемыми заказчиками эксплуатационными характеристиками, удовлетворяющих при этом проектным требованиям по метрологии и устойчивости к внешним воздействиям.

Организация	АО «СНИИП»	ООО НПП «Доза»	ФГУП «ПСЗ»	ООО НПП «Радико»
Устройство	УДЖГ-35Р	УДГП-01	УДЖГ-22Е	УДЖГ-211
Тип детектора	Пластиковый сцинтиллятор	Сцинтиллятор	Сцинтиллятор	Сцинтиллятор
Диапазон измерений, Бк/м ³	$1,0 \cdot 10^3$ ÷ $3,7 \cdot 10^7$	$4,0 \cdot 10^2$ ÷ $3,7 \cdot 10^8$	$2,5 \cdot 10^3$ ÷ $2,5 \cdot 10^6$	$1,0 \cdot 10^3$ ÷ $3,7 \cdot 10^8$

Разработка устройства детектирования объемной активности жидких сред (продолжение)



В рамках ОКР «Кайман» было создано **УДЖГ-43Р** (прототип – УДЖГ-35Р), вместо свинца в качестве материала защиты БД примерен сплав свинца и сурьмы. Это решение позволило создать вариант **сборно-разборной секционной защиты**, монтаж которой может выполняться на любой высотной отметке: защита весом около 450 кг разделена на **60 сегментов массой не более 15 кг**. Таким образом обеспечивается удобство эксплуатации на АЭС, а эффективность регистрации излучения с ослаблением влияния внешнего фона сохраняются на требуемом уровне.

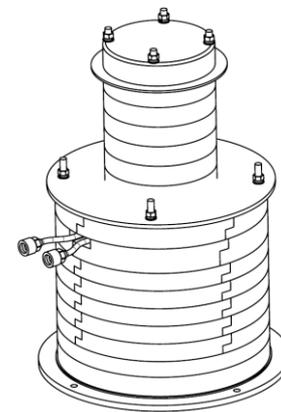
Детектор – **пластиковый сцинтиллятор** (полистирол с добавлением 0,02% РОРОР и 2% р-терфинала) цилиндрической формы $\varnothing 55 \times 200$ мм, выбран по совокупности параметров чувствительности и физических свойств.



Внешний вид УДЖГ-35Р



Внешний вид УДЖГ-43Р



Внешний вид секционной защиты

Разработка устройства детектирования объемной активности жидких сред (продолжение)



Трудоемкость изготовления **снизилась на величину около 4%**, **материальные затраты** остались на целевом уровне (**около 40%** от общей производственной себестоимости).

Удобство эксплуатации и связанные с ней затраты на монтаж, техническое обслуживание и ремонт, является **основным критерием эффективности внедрения** новых УД жидких сред. В случае применения сборно-разборной секционной защиты достигается сокращение времени подготовки оборудования к использованию **с 8 до 2 часов**, т.е. **в 4 раза** по сравнению с вариантом, основанном на применении неразборной защиты.

Диапазон измерений объемной активности УДЖГ-43Р составил от $1,0 \cdot 10^3$ до $1,0 \cdot 10^{12}$ Бк/м³. Сходство диапазонов измерений УДЖГ-43Р с защитой из свинца и рассмотренного до этого УД ИРГ УДГБ-47Р с защитой из вольфрама, составляющих для обоих УД около 9 десятичных порядков, объясняется разницей объемов ИК составляющих 1 л для УДГБ-47Р и 9,8 л для УДЖГ-43Р. Применение 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.

Экономический эффект от внедрения



На примере **УДГБ-47Р** получен экономический эффект от внедрения нового оборудования.

Исходное состояние, применение прибора-прототипа (БДГБ-40П): устройство детектирования объемной активности инертных газов – **15 единиц** на один энергоблок АЭС с реактором ВВЭР. Масса одного прибора – **310 кг**, время установки – **6 часов**, 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 часов**, без применения специального такелажного оборудования, т.е. время монтажа удалось сократить **в 3 раза**. По состоянию на декабрь 2023 года себестоимость изделия составила **4,3 млн руб.**, оценочная **экономия – 33 млн руб. рублей на каждой поставке.**

Обобщение подхода



В результате выполнения ОКР «Кайман» разработаны и освоены в серийном производстве **приборы нового поколения**, созданные на основе **оптимизированных решений** в части материалов радиационной защиты, выбору оптимальных конструкций приборов и их основных компонентов, применения цифровых технологий.

Для измерения ИРГ, разработано новое **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 решения реализованы и при разработке УД йода-131: **масса** нового **УДАГ-09Р** **сокращена** с 226 кг 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 **УДЖГ-43Р** осуществлен переход от свинца в качестве материала защиты БД к **сплаву свинца и сурьмы** (в оптимальном соотношении), создана **сборно-разборная секционная защита**, существенно **упрощена конструкция** прибора и повышен уровень технологичности его изготовления.

Этап «Планирование»



- ✓ **Сравнительный конкурентный анализ** представленных на рынке и выпускаемых предприятием-разработчиком типов оборудования.
- ✓ **Качественная и количественная оценка** технических характеристик и цен на продукцию, в том числе зарубежного производства.
- ✓ **Трассировка контрактных требований** перспективных проектов сооружения АЭС, 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 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.
- ✓ **Определение и оценка конкурентных преимуществ** новых продуктов, исходя из их технических характеристик и цены.

Себестоимость рассматривается как величина, суммирующая трудоемкость производства и материальные затраты (соотношение между составляющими себестоимости определяется экспертным способом на основе изделий-аналогов). **Не превышение лимитной себестоимости является критерием экономической эффективности.** В ряде случаев, себестоимость определяется суммарно для нескольких типов оборудования, вместе образующих законченный измерительный канал АСРК (критерий «цена за канал»).

Этап «Действие»



- ✓ В формате «мозгового штурма» **вырабатывается концепция реализации** нового прибора с лимитной себестоимостью, соответствующего ТЗ: 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 ВУ интеграции и др. 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, решается задача сокращения числа уникальных материалов и комплектующих изделий.
- ✓ Выполняется разработка РКД, 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 ОКР).

Этап «Проверка»



- ✓ **Испытания** опытных образцов, в ходе которых подтверждается достижение заявленных технических характеристик, при необходимости выполняется **доработка** и испытания проводятся повторно.
- ✓ **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.**
- ✓ В отдельных случаях **реализуются компенсирующие мероприятия, направленные на сокращение затрат:** замена марок материалов и комплектующих изделий на более дешевые аналоги, отвечающие требованиям КД, изменение технических требований к деталям и сборочным единицам, измерение содержания и последовательности технологических операций, переработка схмотехнических решений, изменение конструкции корпусов, защит и коммутационных элементов, прямая замена компонентов собственного производства на стандартные общепромышленные изделия с приемлемыми характеристиками, либо обратная замена дорогостоящих материалов и комплектующих изделий на эквиваленты, изготавливаемые собственными силами, изменение технологии изготовления наиболее трудоемких деталей, другие решения, основанные на опыте разработчиков и конструкторов.
- ✓ **Использование САПР** и обязательное **документальное оформление результатов.** Осуществляются **оценки соответствия** в других формах, которые позволяют дополнительно **верифицировать** правильность принятых технических решений.

Этап «Корректировка»



- ✓ Разработка **технологического процесса серийного изготовления** оборудования, на основании которого составляется актуализированная плановая калькуляция. Уточняются **данные по трудоемкости и материальным затратам**, которые снижаются при распределении ресурсов между несколькими изделиями одного типа.
- ✓ **Идентификация** организационных, технических, проектных и иных **рисков**, оказывающих 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.).
- ✓ **Изготовление «пилотной» партии** (или представительского комплекса) 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 ранее, и делаются выводы об экономической эффективности ОКР.
- ✓ 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.
- ✓ **Управление конфигурацией** продукции по совокупности экономических и инженерных данных является сквозным процессом на протяжении всего периода реализации ОКР.

Направления снижения трудоемкости



В качестве путей дальнейшего **снижения трудоемкости** изготовления и **сокращения себестоимости** производства оборудования АСРК 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 **4 этапа** и показывающий особенности выбора решений для конкретных типов приборов, исходя из проектных условий их эксплуатации и оптимальных соотношений основных характеристик изделий.

Это особенности находятся в прямой зависимости от **технической сложности** оборудования и **себестоимости** ее 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 ОКР в условиях быстро изменяющихся условий на рынке ядерного приборостроения.

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.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!