

Разработка контрольных источников для ядерного приборостроения

Ю. В. Лобанов, В. В. Лобанов, А. А. Беспокоев, А. Б. Рогозев

Отраслевая научно-практическая конференция «Ядерное приборостроение. Актуальные вопросы разработки, производства, эксплуатации. метрология ионизирующих излучений», 29 сентября – 01 октября 2021 г., г. Сочи

1 Введение

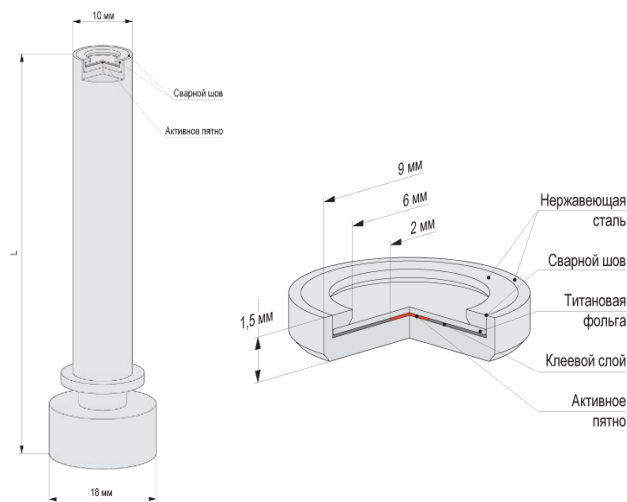
РИТВЕРЦ имеет богатый опыт проектирования источников различной конструкции для применения в самых разных областях. Мы заинтересованы в разработке качественного продукта, отвечающего всем требованиям заказчика и поэтому применяем комплексный подход. В своем докладе я бы хотел рассказать о некоторых ошибках, нюансах проектирования, а также тенденциях сотрудничества с заказчиками.

2 Принципиальные ошибки при организации работ

Хотелось бы подробнее остановиться на некоторых ошибках, с которыми мы сталкиваемся при проектировании источников.

2.1 Недостаточная осведомленность заказчика или производителя оборудования, не позволяющая дать подробное ТЗ на разработку. Зачастую необходимость проектирования возникает не у изготовителя оборудования, а, например, у его клиента, купившего когда-то оборудование. Универсальное решение возникающих проблем, помимо очевидного – повышения компетенции – привлечение проектанта. Необходимо знакомить проектанта не только с аналогами источников и/или паспортами на источники, но и с оборудованием, местом размещения источника, физическими процессами. В таком случае будущая конструкция, даже если она будет отличаться от оригинальных источников, может подойти лучше.

2.1.1 Например, данные источники (см. рис. 1) были спроектированы в соответствии с утвержденным с заказчиком ТЗ на основе оригинальных источников. В них обеспечен выход бета-частиц за счет использования тонкой титановой фольги в качестве материала выходного окна (в оригинале – алюминиевая фольга). Несмотря на то, что данная конструкция удовлетворила спрос заказчика (были осуществлены поставки), конструкция на самом деле менее надежная и технологичная, чем могла бы быть, если бы мы знали, что бета-частицы не используются при измерениях (более того, они «режутся» оборудованием). В оригинальном источнике просто использовали привычную для изготовителя технологию герметизации с помощью фольги и клея, мы могли использовать привычную для нас более надежную конструкцию с металлической крышкой и герметизацию лазерной сваркой, например использовать источники GCo0.11, GBa3.11 с соответствующими держателями (см. рис 2). К негативным результатам разработки стоит отнести: потерю качества (прочности источника), лишнее время проектирования, повышенную цену изделия.



Радионуклид	Номинальная активность *		L, мм	Код
	мКи	кБк		
⁶⁰ Со	0,027 - 2,43	1 - 90	64 ± 0,2	GCo0.30.H
¹³³ Ва	0,108 - 1,35	4 - 50	56 ± 0,2	GBa3.30.H

* Допустимый разброс: ±10 %.
Назначенный срок службы: 10 лет.
Эти источники поставляются с сертификатом калибровки.
По специальному заказу могут поставляться источники другой активности и в корпусах других типов.

Рисунок 1. Источники GCo0.30.H, GBa3.30.H

2.2 Следующая проблема – отказ от привлечения проектантов / поставщиков источников на ранних этапах проектирования оборудования. В этом случае еще можно внести изменения не только в конструкцию источника или придумать переходник / держатель, но и внести изменения в конструкцию оборудования. В противном случае можно получить некачественную разработку, в результате которой будет разработана неоптимальная конструкция.

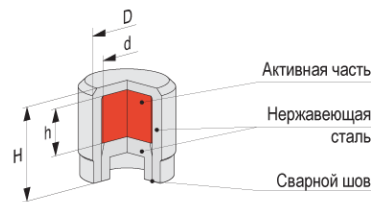
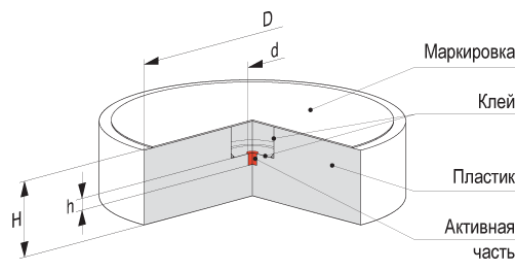


Рисунок 2. Источники GCo0.11, GBa3.11

2.2.1 Взгляните на пример сборок рентгеновских источников с барием-133. Изначальную конструкцию (она изображена слева) вполне можно назвать неоптимальной. Мощность дозы излучения на расстоянии 10 см от любой доступной точки поверхности прибора заказчика с установленной сборкой источника при любых нормальных условиях эксплуатации не должна была превышать 1 мкЗв/ч. Также данные сборки перевозились в индивидуальной упаковке, которая должна была быть освобожденной, то есть мощность дозы излучения в любой точке на поверхности упаковки не должна превышать 5 мкЗв/ч. Однако, изначально конструкция практически обрезала эти значения до уровня фона. Это, конечно, неплохо, однако за такое решение приходилось дорого платить. Как следствие – высокая цена и неудобство при эксплуатации. Были лишние звенья в цепочке поставок и излишняя, превышающая требования в несколько раз, защита. Нам удалось сократить массу почти в 3,5 раза, при этом обеспечив требования по мощности дозы с коэффициентом запаса около 2, а также локализовать часть комплектующих. Учитывая, что в качестве защиты использовался в том числе вольфрам, а в цепочке поставок был американский производитель комплектующих, данные изменения привели к ощутимому снижению цены при увеличении надежности поставок.



D × H, мм	d × h, мм	Номинальная активность *		Код
		мКи	кБк	
25,4 × 6,4	1 × 1	0,01	370	GNa2.M.28.1
25,4 × 6,4	2 × 1	0,01	370	GNa2.M.28.2

* Допустимый разброс: ±10 %.
Классификация ISO: C22212.
Назначенный срок службы: 5 лет.
По специальному заказу могут поставляться источники другой активности и в корпусах других типов.

Рисунок 3. Источники GNa2.M.28

2.3 Выбор источника для оборудования только по одному параметру: целевой радионуклид и активность, например. Сложно представить, чтобы инженер при выборе необходимого винта ориентировался только на диаметр резьбы. Сталь, латунь, пластик – не важно, главное, чтобы резьба была М4. Однако, для источников мы такое, к сожалению, наблюдаем. Иногда получается переориентировать заказчика вовремя, иногда для этого нужны годы. Выбор должен осуществляться по всем параметрам, учитывать прочность источника, которая выражена в его классах прочности, условия эксплуатации, назначение и т. д.

2.3.1 Показателен пример использования не по назначению источников ОСГИ-РТ и ОСГИ-П. На рис. 4 вы можете видеть во что они превратились, когда вместо использования по назначению, как контрольные или эталонные источники, они были использованы в приборах как промышленные источники.



Рисунок 4. Поврежденные источники ОСГИ-РТ и разрушенный источник ОСГИ-П

2.4 Следующая проблема – стремление производителя оборудования к уникальности именно их источника. Такой подход в принципе понятен – это защита интеллектуальной собственности, собственных наработок, но в итоге, если отнести к источнику как элементу, который требует своевременной замены в течение всего срока эксплуатации оборудования – мы видим в таком пути большую проблему. Понятно, что это стремление не на пустом месте, а результат конкурентной борьбы. Но разработчик в данном случае близорук, он не понимает, что если он закладывает проблемы для замены отработавшего источника в оборудовании, то его шансы в борьбе с конкурентами резко уменьшаются.

2.4.1 Приведем пример источников с K_r-85 (источники подобны тем, что изображены на рис. 5) для оборудования компаний ABB (АББ) и Voith (Фойт). Данные компании совместно с производителем источников EZAG (ЕЗАГ) разработали необходимые источники, после чего заключили с ЕЗАГ эксклюзивные права на покупку данных типов только через себя. Данные компании имеют очень сложную и длительную закупочную процедуру, срок достигает 24 недель, когда как стандартный срок поставки подобных типов источников от этого же производителя источников – 8 недель. Навязана поставка источников только в блоках, без возможности осуществления перезарядки. В итоге, дополнительная цена на «железе», которое никому не нужно, на упаковке, на логистике. Итоговая цена вырастает в 5–7 раз по сравнению с «голым» источником. И если бы это был «стандарт» для отрасли – так нет, есть примеры разумного подхода, когда финские производители оборудования позволяют как покупать источники напрямую у производителя источников, так и перезаряжать их самостоятельно. И вот это уже настоящее конкурентное преимущество.

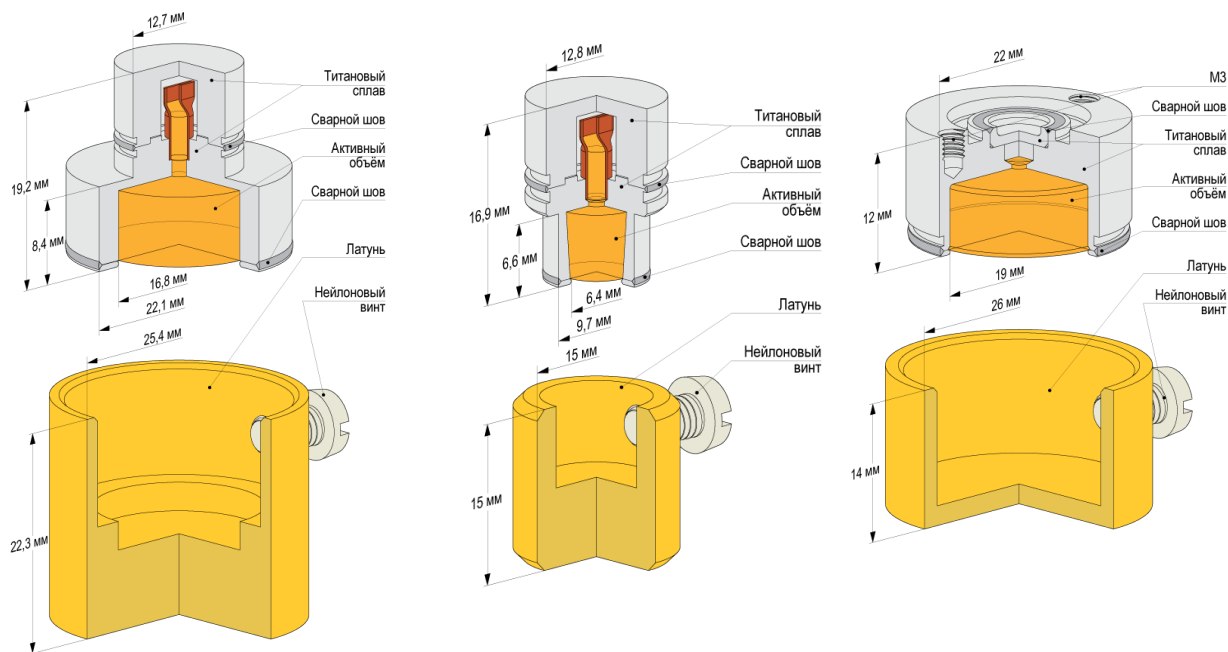


Рисунок 5. Примеры источников с K_r-85

2.5 Позитивным примером, в котором удалось избежать всех перечисленных ошибок, можно назвать недавнюю разработку и поставку источников с цезием-137 для измерения плотности твердых осадочных пород. Изначально Заказчик запросил источник в конструктиве ОСГИ, который совершенно не подходил для задачи. В результате были поставлены источники в 27 капсуле из нержавеющей стали с разработанным массивным вольфрамовым держателем, заказчиком было спроектировано посадочное место соответствующей конструкции (см. рис. 6).

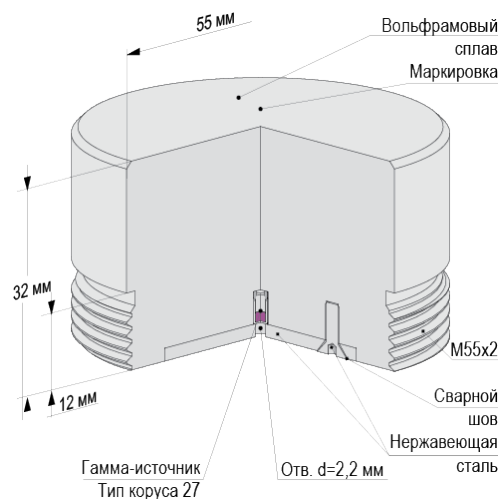


Рисунок 6. Источники GCs7.27, 5 МБк

3 Нюансы, особенности проектирования и общения с заказчиком

От ошибок мы переходим к нюансам, особенностям проектирования. Здесь надо понимать, что ИИИ – продукция специфичная. Она имеет свои «сроки годности» из-за распада, особые требования по обращению, перевозке, упаковке, находится под пристальным контролем регулирующих органов. Конечно, это все приводит к тому, что есть свои нюансы организации работ.

3.1 Первое, на что хотелось бы обратить внимание – это инертность, сила привычки, консервативность подхода – ориентация на старого поставщика препятствует поиску новых, возможно более качественных аналогов. Или же необходимость перехода на новый тип источника или нового поставщика возникает срочно, когда уже пора покупать источник, что невозможно из-за большого срока проектирования и сертификации. Можно провести параллель с кораблем, которому необходимо повернуть. Чем корабль больше, тем радиус поворота будет больше, так и с компаниями, заказывающими источники. Но при определенных обстоятельствах, отказ от поворота корабля может привести к катастрофе. При этом попытка что-то поменять даже со стороны собственного персонала заказчика сталкивается с проблемами согласования, изменений в документации. Всегда необходима системная оценка технических решений и, в случае экономической обоснованности, внесение изменений в конструкцию.

3.1.1 К нам обратился один поставщик из Европы с просьбой разработки, изготовления и поставки источника из латуни для их заказчика – крупного производителя оборудования. Способ герметизации – пайка (см. рис. 7, а). Лично у меня при виде этой конструкции возникли ассоциации с изготовлением флюгеров из меди, когда делают две половины и потом спаиваются, такая старая кустарная технология. Для того, чтобы переубедить заказчика отказаться от латуни и пайки, перейти на более современные материалы и технологии (нержавеющую сталь и сварку, см. рис. 7, б), пришлось провести разработку и изготовление неактивных образцов. После чего были заказаны такие источники. Однако, мы потеряли довольно много времени.

3.1.2 В рассказанном примере выше про сборку бариевого источника в общем сложности прошло около 5 лет, прежде чем нам удалось склонить заказчика к пересмотру конструкции и внесению изменений, что вылилось в огромные лишние затраты заказчика.

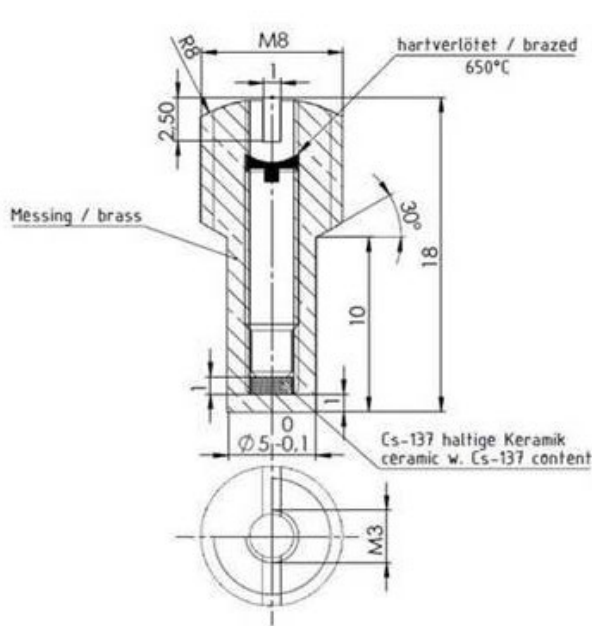


Рисунок 7, а. Эскиз от заказчика. Латунный источник с герметизацией высокотемпературной пайкой

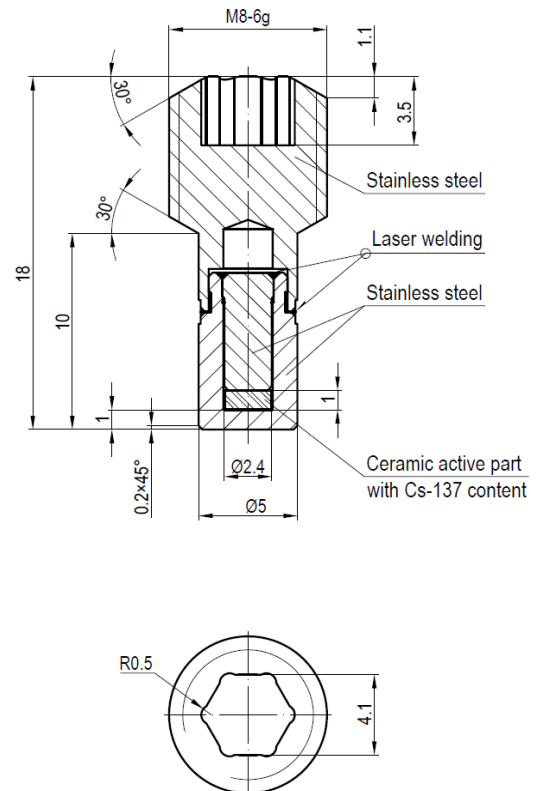
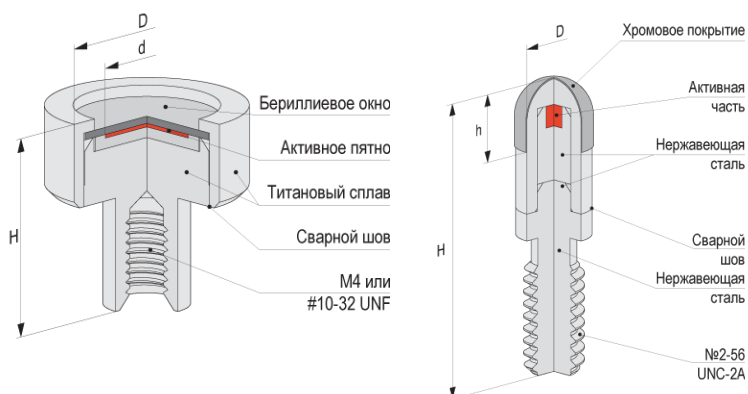


Рисунок 7, б. Разработанные источники GCs7.48 (до 5 МБк)

3.2 Несоблюдение принципов взаимозаменяемости при проектировании оборудования. Как известно, взаимозаменяемость – это свойство элементов конструкции, изготовленных с определённой точностью геометрических, механических, электрических и иных параметров, обеспечивать заданные эксплуатационные показатели вне зависимости от времени и места изготовления при сборке, ремонте и замене этих элементов. Учитывая специфику источников, мы должны стремиться обеспечить полную взаимозаменяемость или, в случае невозможности, регулировку.

3.2.1 Мы в РИТВЕРЦ часто сталкиваемся с данной особенностью. Дюймовые и метрические размеры, отсутствие требований по допускам на размер или нестандартные допуски, нестандартные резьбы и так далее. Подобные решения требуют покупки нестандартных измерительных инструментов, например калибров, а также нестандартного режущего инструмента, что, как правило, приводит к удорожанию и увеличению сроков разработки или поставки. На рис. 8 приведены примеры резьб UNC, UNF – не свойственных нам, но популярных за рубежом, а также калибр для нестандартной резьбы M84x2-6g, выдержка из запроса заказчика с размерами 9,98 мм и 1,27 мм.



Внешние размеры, мм	
Диаметр	Высота (толщина)
10,00	1,27
9,98	5

Рисунок 8. Несоблюдение принципов взаимозаменяемости

3.2.2 Иногда это бывают комичные, абсурдные ситуации, которые, тем не менее имеют совершенно реальные последствия. Во Франции у нас был заказчик, которому были нужны источники XCd9.06 диаметром не 8 мм с соответствующими допусками «в минус», а 7,9 мм. Таким способом заказчик перестраховывался, считая, что простой посадки с зазором по допускам недостаточно, а необходимо иметь зазор в номинальных размерах. В течение 5 лет, пока они не перешли на стандартный размер 8 мм, мы вынуждены были дублировать фактически свои запасы аналогичными корпусами, включать этот размер при сертификации и так далее.

3.3 При разработке и поставке источников важным моментом является понимание того, какие характеристики являются целевыми для заказчика. При этом производитель / поставщик источников должен иметь возможность для проверки этой характеристики или обеспечение этой характеристики через другие параметры, сравнивая, например полученные характеристики нового источника с утвержденным образцом.

3.3.1 На рис. 9 вы можете видеть рентгеновские источники с кадмием-109 для носимых приборов рентгенофлуоресцентного анализа. Целевыми характеристиками являются поток фотонов и радионуклидная чистота. Было необходимо соотнести наши измерения и их измерения, это иногда не так просто сделать: требования по дозе, по интенсивности, по выходу гамма-частиц и активности конфликтуют друг с другом. Определенные требования заказчика по этим характеристикам повлияли на конструкцию источника, на технологию изготовления и на используемое сырье.

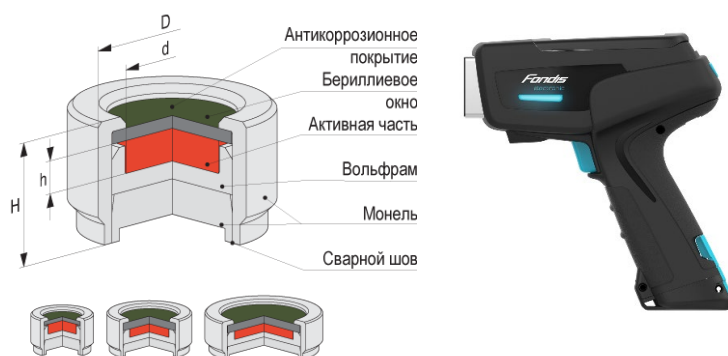


Рисунок 9. Рентгеновские источники XCd9 для носимых приборов РФА с целевой характеристикой – потоком

3.3.2 Другим ярким примером целевых характеристик является проведение так называемого Rattle test или теста на дребезг. Его проводят для этого же типа источников, то есть для X_{Cd9} для другого заказчика, для которого важно сохранение параметров источника, включая потоки, после воздействия на него вибрации определенных параметров. Для проверки данного требования была осуществлена поставка специального оборудования. Данное требование также оказало влияние на технологию изготовления и конструкцию источника.

3.3.3 Еще один пример – в настоящее время нами ведется разработка источника для медицинского применения. Важным параметром данного источника является создаваемое им дозовое поле. Рис. 10 демонстрирует создаваемое дозное поле в плоскостях параллельных окну источника через водозэквивалентный фантом на разных глубинах. Конструкция и технология должны обеспечивать определенный вид изодозных кривых. Для этого источника другие параметры, которые, безусловно, будут оказывать влияние, как например закладываемая активность и мощность дозы, уходят на второй план.

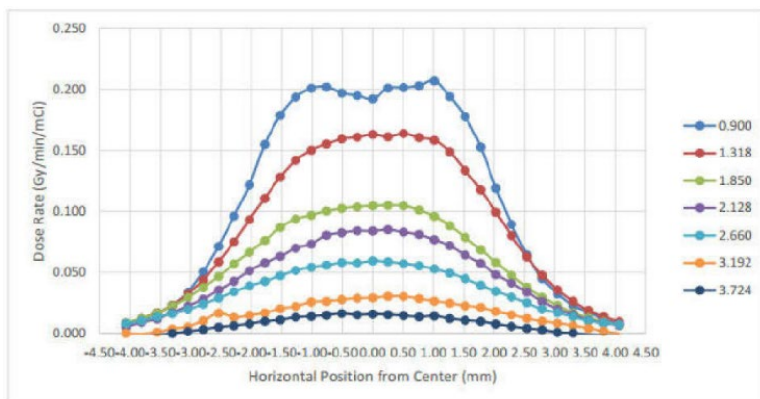


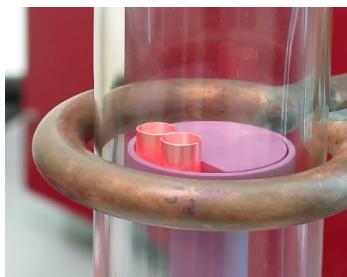
Рисунок 10. Изодозные источники со стронцием-90

3.4 Еще одна особенность, связанная с тем, что сроки службы источников и оборудования могут составлять десятки лет – необходимость обеспечения доступности материалов и технологий. Да, эта проблема существует для многих областей. Но область изготовления ИИИ, учитывая разнообразие конструкций, концентрирует в себе огромное количество специфических материалов и технологий. За время сроков службы источника фирмы закрываются, меняется политическая обстановка в мире и, в итоге, могут быть даже утеряны технологии, необходимые для производства того или иного типа источника.

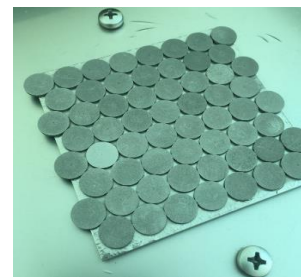
3.4.1 Мы наблюдаем проблемы с поставками некоторых материалов. Например бериллия, керамики из оксида бериллия, титановой фольги, которую мы покупали за рубежом. Из-за политики стран-поставщиков данных материалов их ввоз затруднен или невозможен. Если есть такая возможность, при проектировании источников необходимо ориентироваться на коммерчески доступные материалы, рассматривать зарубежные и отечественные аналоги.



Диски из бериллия



Пайка титановых корпусов с бериллием в вакууме



Подложки из графита с напыленным родием



Фольга из титана VT1-0, толщина 2 мкм



Партия корпусов из монель-металла с бериллиевыми окнами для источников GBa3.06



Пористая керамика после испытаний на сжатие

Рисунок 11. Примеры материалов и технологий

3.4.2 То же самое и для технологий. Для обеспечения надежности поставок мы концентрируем наиболее важные технологии у себя. Помимо, само собой технологий изготовления активных частей, сварки и так далее, мы имеем собственные участки высокотемпературной пайки в вакууме рентгеновских окон в корпуса из монель-металла, титана и нержавеющей сталей, участок производства легкой пористой керамики, участок магнетронного напыления. Такой путь наиболее безопасен не только для нас, но и для заказчика, необходимо его придерживаться. На рис. 11 приведены некоторые примеры материалов и технологий.

4 Тенденции

От ошибок и нюансов мы переходим к тенденциям сотрудничества в вопросах разработки и поставки ИИИ.

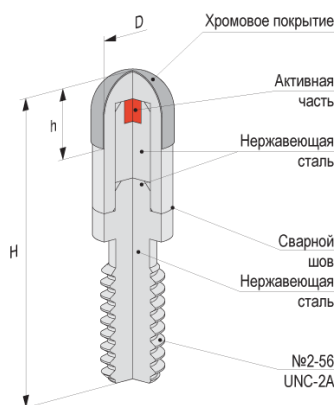
4.1 Импортозамещение. Само слово звучит уже давно. Некоторые предприятия имеют собственный программы импортозамещения. Надо отметить, что сейчас в стране производятся далеко не все типы источников, которые требуются для рынка. Однако, многие могут быть замещены отечественными аналогами в приемлемые сроки. В данном случае нужна совместная работа с изготовителями / импортерами оборудования с разработчиками и поставщиками ИИИ.

4.1.1 Мы активно работаем с заказчиками в рамках программ импортозамещения. На рис. 12 конструкция источника GBa3.47, применяемого для Жидкостных сцинтилляционных спектрометров Tri-Carb (источник имитации радиационного гашения сцинтилляции). Конструкция примечательна размерами активной части – всего 0,8×0,8 мм, наличием хромового покрытия полусферического корпуса. Также, как наиболее технологичный метод изготовления вкладыша, была выбрана 3D-печать нержавеющей сталью с последующей доработкой.

4.1.2 На рис. 13 конструкция источников GCs7.38, используемых в качестве калибровочных источников для каротажа нефтяных скважин. Особенно примечателен конструктив источника диаметром 10 мм и высотой всего 1,2 мм, обратите внимание на классы прочности С66545:

- Температура (максимальный класс): -40 °С (20 мин) +800 °С (1 ч) и термоудар до 20 °С
- Давление (максимальный класс): 25 кПа абсолютного до 170 МПа абсолютного
- Удар: 5 кг с высоты 1 м (в плоскую часть и в ребро)
- Вибрация (максимальный класс): 3 цикла по 30 мин от 25 до 80 Гц при 1,5 мм, амплитуде от пика до пика и от 80 до 2000 Гц при 196 м/с² (20gn)
- Прокол: 300 г с высоты 1 м

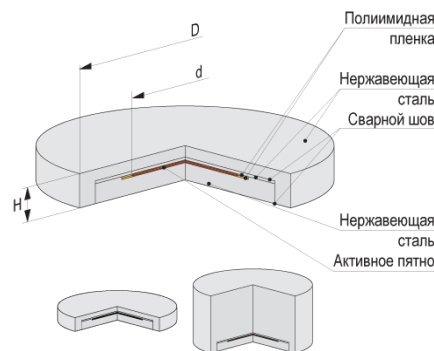
Данные результаты удалось получить только в результате плотной работы разработчиков с испытательной лабораторией в рамках доводочных испытаний.



Радионуклид	D × H, мм	h, мм	Номинальная активность *		Код
			мКи	МБк	
¹³⁵ Ba	2,8 × 10,9	2,5	0,0027 - 0,1	0,1 - 3,7	GBa3.47

* Допустимый разброс: -10 + +20 %.
Классификация ISO: С66444.
Назначенный срок службы: 15 лет.
По специальному заказу могут поставляться источники другой активности.

Рисунок 12. Источники GBa3.47



Радионуклид	D × H, мм	d, мм	Номинальная активность *		Код
			мКи	МБк	
¹³⁷ Cs **	10,0 × 1,27	3,0	0,0027 - 0,27	0,1 - 10,0	GCs7.38.1
¹³⁷ Cs **	10,0 × 5,0	3,0	0,0027 - 0,27	0,1 - 10,0	GCs7.38.2
⁶⁰ Co	10,0 × 1,27	3,0	0,0027 - 0,135	0,1 - 5,0	GCo0.38.1
⁶⁰ Co	10,0 × 5,0	3,0	0,0027 - 0,135	0,1 - 5,0	GCo0.38.2
²² Na	10,0 × 1,27	3,0	0,0027 - 0,27	0,1 - 10,0	GNa2.38.1
²² Na	10,0 × 5,0	3,0	0,0027 - 0,27	0,1 - 10,0	GNa2.38.2
²⁴¹ Am	10,0 × 1,27	3,0	0,000135 - 0,008	0,005 - 0,3	GAm1.38.1
²⁴¹ Am	10,0 × 5,0	3,0	0,000135 - 0,008	0,005 - 0,3	GAm1.38.2

* Допустимый разброс: -10 + +20 %.
** Доля Cs-134: не более 1 %.
Классификация ISO: С66545.
Назначенный срок службы: 10 лет.
По специальному заказу могут поставляться источники другой активности и в корпусах других типов.

Рисунок 13. Источники GCs7.38

4.2 Поставка источников в составе блоков. Наиболее перспективным вариантом поставок на сегодняшний день является модель, при которой поставка осуществляется блоками. Это позволяет экономить средства, обеспечивает лучшую логистику, позволяет контролировать во всех аспектах применение ИИИ (монтаж и демонтаж средствами поставщика ИИИ). При проектировании источников и оборудования следует применять такой же подход.

4.2.1 На рис. 14 показана конструкция упоминаемых мною сборок источников GBa3.06, которые поставляются конечным пользователям по всему миру. Поставки осуществляются в специальной разработанной под данный тип блоков упаковке, которая является освобожденной. Партиями от одной штуки до сотен. Вся сборка источника изготавливается на предприятии. Яркий пример, когда от поставок «голых» источников при сотрудничестве с заказчиком мы пришли к данному взаимовыгодному пути.

4.2.2 РИТВЕРЦ осуществляет перезарядку блоков электрозахватных детекторов источниками с никелем-63 для некоторых заказчиков (см. рис. 15). После перезарядки осуществляется проверка герметичности камер, таким образом заказчику отправляются готовые для установки в оборудование блоки. Данные источники поставляются и отдельно, заправка в оборудование, в блоки, осуществляется заказчиком. Такой путь не выглядит оптимальным. Мы наблюдаем двойную работу по упаковке, заказчик должен с особой осторожностью осуществлять зарядку, иначе существует возможность повреждения источника, что в свою очередь имеет последствия, которые на стороне изготовителя источника решались бы проще и так далее.

При поставке источников в блоках вся специфичная работа по обращению с ИИИ ложится на плечи изготовителя ИИИ, такое разделение труда является взаимовыгодным.

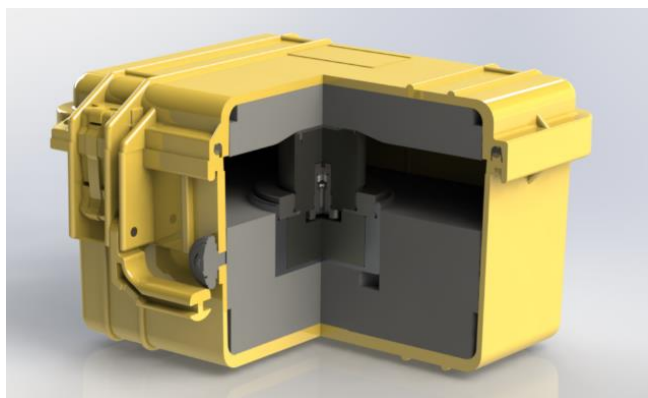
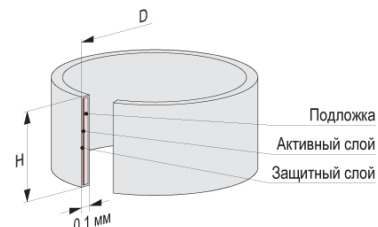
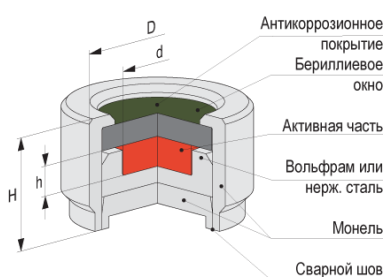


Рисунок 14. Источник GBa3.06 в составе блока в индивидуальной освобожденной упаковке



Рисунок 15. Цилиндрический источник BNi3 и электрозахватный детектор

Спасибо за внимание!