ISSN 2075-1338

Аппаратура и новости радиационных измерений

АНРИ

№4(119) 2024



Проблемы жидкосцинтилляционной спектрометрии в современных условиях

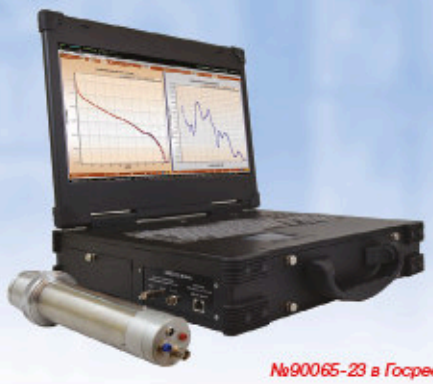
Фукусима. Опасность вторичной критичности разрушенного топлива

Твердотельные детекторы оптических сигналов и радиации

ПРИБОР НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

SDMF-1608SN

Спектрометр-дозиметр нейтронов и гамма-квантов



№90065-23 в Госреестре СИ РФ

Назначение

*Спектрометр-дозиметр типа **SDMF-1608SN** является средством измерения и предназначен для измерения энергетического распределения плотности потока нейтронов и гамма-квантов в реальном времени. Также позволяет измерять интегральный поток медленных нейтронов с помощью второго детектора.*

Основываясь на измерении спектров нейтронов и гамма-квантов вычисляется мощность эффективной и поглощенной дозы, а также мощность амбиентного эквивалента дозы.

Для гамма излучения также вычисляется мощность экспозиционной дозы и мощность поглощенной дозы в воздухе.

Все дозовые характеристики рассчитываются исходя из геометрии источника радиации и условий облучения человека.

Отличительные особенности

- *Одновременное измерение энергетических спектров быстрых нейтронов и гамма- квантов одним детектором.*
- *Спектрометр-дозиметр работает в реальном масштабе времени.*
- *Измерение как непрерывных (например, "реакторных"), так и линейчатых (изотопных) энергетических спектров.*
- *Измерение плотности потока быстрых нейтронов и гамма-квантов в абсолютных единицах (частица*см$^{-2}$*с$^{-1}$*МэВ$^{-1}$).*
- *Максимальная загрузка по входу детектора $3*10^4$ импульсов.*

Информация для заказа

- ***SDMF-1608SN** – Возимый спектрометр-дозиметр с диапазоном энергий нейтронов от 0.03 эВ до 16 МэВ и гамма-квантов от 240 кэВ до 8 МэВ.*
- ***UNSD-20** – Универсальный нейтронный спектрометр-дозиметр с диапазоном энергий нейтронов от 0.03 эВ до 20 МэВ и гамма-квантов от 100 кэВ до 9 МэВ.*
- ***SDMF-1608** – Возимый спектрометр-дозиметр с диапазоном энергий нейтронов от 1 МэВ до 19 МэВ и гамма-квантов от 500 кэВ до 8 МэВ.*
- ***SDMF-1206SN** – Возимый спектрометр-дозиметр с диапазоном энергий нейтронов от 0.03 эВ до 12 МэВ и гамма-квантов от 100 кэВ до 6 МэВ.*

Применение

- *Средство измерения энергетического распределения плотности потока нейтронов и гамма-квантов за биологической защитой ядерно-энергетических установок.*
- *Определение мощности эффективной дозы, мощности амбиентного эквивалента дозы и мощности поглощенной дозы нейтронов и гамма-квантов.*
- *Определение мощности экспозиционной дозы гамма излучения.*
- *Эталон плотности потока быстрых нейтронов.*
- *Калибратор интегральных дозиметров для гамма и нейтронных полей.*
- *Калибратор для поверки установок, формирующих поля излучения быстрых нейтронов и гамма-квантов.*

ПАРАМЕТРЫ	ЗНАЧЕНИЯ
Диапазон энергий регистрируемого нейтронного излучения (с дополнительным детектором медленных нейтронов)	(0.03 эВ – 100 кэВ)* 500 кэВ - 16 МэВ
Диапазон энергий регистрируемого гамма излучения	**240 кэВ – 8 МэВ**
Количество энергетических каналов быстрых нейтронов и гамма-квантов	1024
Нижняя и верхняя граница измерения мощности эффективной дозы	**(от 0.2 до 17 500**) мкЗв/ч**
Среднее отклонение показаний от истинных значений при измерении интегральной (дифференциальной) плотности потока нейтронного излучения	не более ±7% (±15%)
Среднее отклонение показаний от истинных значений при измерении мощности амбиентного эквивалента дозы нейтронного излучения	**не более ±12%**
Среднее отклонение показаний от истинных значений при измерении мощности амбиентного эквивалента дозы H*(10) гамма излучения	не более +12%
Энергетическое разрешение на энергии 662 кэВ (^{137}Cs) при детекторе 40x40	**не более 12%**
Анизотропия для нейтронного излучения	не более +30%
Максимальный поток нейтронов через сцинтиллятор (без учета восстановления)	**10^3н/см^2**
Рабочая загрузка детектора	10^4 импульс/с
Размерность вычисляемых доз	**Зв/ч, Зв/с, Гр/ч, Гр/с, рад/с, рад/ч, Р/с, Р/ч**
Питание от аккумулятора +12В***	не более 3 часов
Размер спектрометра-дозиметра, мм Размер детектора быстрых нейтронов, мм Размер детектора медленных нейтронов, мм	**415 x 165 x 360 245 x диаметр 65 190 x диаметр 59**
Вес спектрометра-дозиметра, включая вес детекторов	не более 10 кг

* - один энергетический канал

**-при соблюдении максимальной загрузки

***-опция под заказ

ООО «Центр АЦП»

Россия, 125040, Москва, ул. Верхняя, д. 6

тел.: (499) 257-45-03, 257-45-09, 257-45-14

mail@centeradc.ru

www.centeradc.ru

DOI: 10.37414/2075-1338-2024-119-4-3-12 УДК 539.16.07:539.1.074.6

Проблемы жидкосцинтилляционной спектрометрии в современных условиях. Сцинтилляционный коктейль

Ю.Н.Гончар, Н.О.Гудыменко, И.А.Каширин, В.А.Гудыменко, С.В.Малиновский

ООО Главный контрольно-испытательный центр питьевой воды (ООО «ГИЦ ПВ»), г. Москва

Приведены основные проблемы жидкосцинтилляционной спектрометрии в нынешних условиях. Проанализирована возможность работы на ЖС радиометрах при использовании сцинтилляционных коктейлей, созданных на базе доступных в России реагентов. Показаны сравнительные результаты тестирования модельных радионуклидных смесей в фирменных (ULTIMA GOLD AB, INSTA-FLUOR) сцинтилляционных коктейлях и приготовленных в лабораторных условиях на основе ароматического растворителя толуола (ксилола).

Ключевые слова: *жидкосцинтилляционная спектрометрия, сцинтилляционный коктейль, экстракционная технология, радионуклидный анализ, счетный образец.*

Жидкосцинтилляционная спектрометрия (ЖСС) в сочетании с современными методами разделения и концентрирования радионуклидов обладает рядом преимуществ, основными из которых являются высокая эффективность регистрации практически всех видов излучения и быстрота приготовления счетных образцов при минимальной трудоемкости аналитического процесса. Поэтому этот метод определения радиоактивности в последние десятилетия входит в число наиболее востребованных практически во всех отраслях, использующих радиоизотопы. Разработанный ранее инновационный методический подход [1-10] позволил значительно расширить возможности коммерчески доступных жидкосцинтилляционных радиометров, в большинстве случаев превратив

их в полноценные спектрометры, способные определять радионуклидный состав измеряемых проб. В настоящее время разработанное специализированное программное обеспечение (СПО) «SpectraDec/LiquidMaster», реализующее этот подход, используется на многих предприятиях России, в том числе практически на всех атомных станциях и многих других специализированных предприятиях, занимающихся радионуклидным анализом и использующих в своей деятельности радиоизотопы (ФГУП «РАДОН», ООО «ГИЦ ПВ», АО «ВНИИАЭС», ФГУП «ПО «МАЯК», АО «ИРМ», «ГХК», АО «СХК», НИЦ БТС, подразделения НИЦ «Курчатовский институт», ФМБА, Центры гигиены и эпидемиологии и т. д.).

Однако в последнее время в связи со сложившейся ситуацией и введенными санкционными ограничениями, в области ЖС спектрометрии возникли ощутимые проблемы, которые достаточно подробно описаны в работе [11]. Это, прежде всего, невозможность приобретения новых зарубежных ЖС приборов, а также расходных материалов, без которых ЖС спектрометрия неосуществима. С флаконами для ЖС измерений задача в настоящее время более-менее решается, со сцинтилляционными же коктейлями дела обстоят крайне плохо.

Необходимо отметить, что применяемое в России СПО «SpectraDec/LiquidMaster» для расшифровки ЖС спектров базируется на калибровочных спектрах счетных образцов, приготовленных из смеси образцовых растворов радионуклида и сцинтилляционного коктейля UltimaGold AB (или OptiPhase HiSafe) на основе растворителя ди-изопропилнафталина. Эти коктейли сейчас можно приобрести по параллельному импорту по ценам, которые в 4–5 раз превышают досанкционные, да и сроки поставки могут достигать многих месяцев. При этом сама возможность поставки может исчезнуть в любой момент.

Настоящая работа посвящена тестированию возможности приготовления сцинтилляционных коктейлей на основе доступных реагентов, способных если не заменить фирменные коктейли, то хотя бы приблизиться к их характеристикам и обеспечить работоспособность откалиброванных на этих коктейлях приборов.

Приготовление сцинтилляционного коктейля в лабораторных условиях из доступных реагентов

Применяемые в настоящее время в России сцинтилляционные коктейли на основе растворителя ди-изопропилнафталина (Ultima Gold AB, OptiPhase HiSafe III) по своим свойствам являются оптимальными для спектрометрических измерений. Они хорошо смешиваются с водой (в идеальном случае 1:1) и минеральными кислотами, сохраняя удовлетворительный уровень гашения[1] счетного образца, обеспечивают наилучшее разделение альфа- и бета-излучений, приемлемое разрешение альфа-пиков и считаются биодеградируемыми, более безопасными для здоровья.

В настоящее время приобретение этих сцинтилляционных коктейлей достаточно проблематично, в равной степени как и растворителя ди-изопропилнафталина для их приготовления.

Авторами предпринята попытка создания в лабораторных условиях сцинтилляционного коктейля на основе доступных реагентов («лабораторный» коктейль), который смог бы если не заменить фирменные коктейли, то хотя бы обеспечить приемлемую работоспособность имеющегося ЖС оборудования в комплексе с СПО «SpectraDec/LiquidMaster».

[1] Гашение (тушение, quenching) – энергетические потери, происходящие в процессе преобразования энергии распада в электрические импульсы ФЭУ, приводящие к деформации измеряемого спектра.

В качестве основного компонента коктейля взят ароматический растворитель толуол. К сожалению, он не смешивается с водой. Проблема решается добавлением к толуолу эмульгатора (солюбилизатора), обеспечивающего совместимость создаваемого коктейля с водой. Этим солюбилизатором является Тритон Х-100 (октилфенолдекаэтилен-гликолевый эфир $C_{34}H_{62}O_{11}$). Также в состав коктейля необходимо ввести сцинтилляторы, которые и обеспечат фотовспышки при взаимодействии с радиоактивным излучением. В нашем случае это первичный сцинтиллятор 2,5-дифенилоксазол (ППО) с максимумом флюоресценции в области 375 нм и вторичный сцинтиллятор [1,4-бис-[2-(5фенилоксазолил)]-бензол (ПОПОП) с максимумом флюоресценции в области 415 нм, которая является оптимальной для чувствительности современных ФЭУ.

Коктейли готовили с постоянным содержанием ППО (0,4%) и ПОПОП (0,02%) и переменной концентрацией Тритона Х-100.

Необходимо отметить, что смешение всех перечисленных компонентов при комнатной температуре (≈22–25 °С) в конечном итоге не приводит к подходящей совместимости с водой (не более 200 мкл водной пробы), несмотря на наличие даже достаточно высоких (до 30%) концентраций эмульгатора.

Для того, чтобы приготовляемый коктейль совмещался с водными пробами, необходимо нагреть как толуол, так и Тритон Х-100 в отдельной посуде до температуры порядка 45 °С, и только после этого их смешивать. Далее охладить до комнатной температуры и добавить сцинтилляторы. Перед подготовкой счетных образцов (СОБР) с водными (кислотными) пробами коктейль желательно выдержать 2–3 часа при температуре измерений.

Нами был приготовлен ряд сцинтилляционных коктейлей с возрастающей концентрацией Тритона Х-100. В табл.1 приведены полученные начальные характеристики фоновых СОБР с 10 мл коктейлей, измеренных на ЖС «Tri-Carb 4810» в течение 30 мин.

Тестирование «лабораторных» сцинтилляционных коктейлей на совместимость с водными пробами и минеральными кислотами

Для выяснения границ совместимости с водными и кислотными пробами проведены эксперименты по внесению в одинаковые объемы (10 мл) коктейлей с возрастающими количествами эмульгатора. В каждый из флаконов вносили увеличивающиеся объемы воды и кислоты с визуальным контролем качества счетного образца. Для лучшей визуализации опыты проводились в стеклянных 20 мл флаконах для ЖС измерений. Также получены соответствующие зависимости значения параметра гашения (tSIE), получаемого СОБР от объема вносимых растворов. В табл. 2 и 3

Табл.1. *Свойства фоновых счетных образцов, приготовленных на основе ароматического растворителя толуола с постоянным содержанием первичного (ППО) и вторичного (ПОПОП) сцинтилляторов и переменным содержанием Тритона Х-100 (в сравнении с коктейлем Ultima Gold AB).*

№ п/п	Содержание Тритон Х-100, %	Значение гашения (tSIE)	Скорость счета (CPM)	Значение люминесценции (Бк)
1	20	654	32	≈ 0,03
2	31	563	33	≈ 0,03
3	39	502	33	≈ 0,03
4	50	421	35	⩽ 0,1
5	60	356	36	⩽ 0,1
Ultima Gold AB («PerkinElmer»)		687	33	≈ 0,03

представлены полученные значения для проб воды и 1М HNO_3, соответственно. В качестве «эталона сравнения» был выбран фирменный коктейль Ultima Gold AB.

Представленные данные свидетельствуют о том, что по параметру гашения к фирменному коктейлю Ultima Gold AB наиболее близок приготовленный «лабораторный» коктейль №1 (содержание тритона 20%). Однако не менее важна совместимость коктейля с водными (кислотными) пробами. Ниже приводятся эти данные (табл. 2 и 3).

Показано, что с точки зрения совместимости с водными (кислотными) пробами из приготовленных «лабораторных» смесей наиболее приемлемы коктейли с содержанием тритона X-100 31% и 39%, которые смешиваются с 3–5 мл водной пробы, сохраняя при этом удовлетворительную гомогенность, прозрачность и уровень гашения счетного образца.

«Лабораторные» коктейли с высокой концентрацией тритона (50%, 60%) изначально лучше смешиваются с большими объемами водных проб, но имеют при этом плохие характеристики по гашению, со временем могут загустевать, образуя мягкие гели, что препятствует равномерному распределению радиоактивности по объему счетного флакона при перемешивании. Для небольших объемов (до 3–5 мл) проб они также удовлетворительно применимы. Кроме того, были проведены подобные эксперименты по совместимости с водными растворами и растворами 1М HNO_3 «лабораторных» коктейлей, в которых ароматический растворитель толуол был заменен на ксилол. Полученные результаты «ксилольных» коктейлей

Табл.2. *Свойства СОБР (параметр гашения tSIE, прозрачность, гомогенность) с различным содержанием Тритона X-100, приготовленных с добавлением возрастающего количества* ***H_2O****.*

Содержание Тритона X-100, %	+1 мл H_2O		**+2 мл H_2O		+3 мл H_2O		+4 мл H_2O		+5 мл H_2O		+7 мл H_2O	
	*Прозрачность	tSIE	Прозрачность	tSIE	Прозрачность	tSIE	Прозрачность	tSIE	Прозрачность	tSIE	Прозрачность	tSIE
20	++–	519	+––	483	–––	470	Исключен					
31	+++	420	+++	374	++–	346	+––	327	Исключен			
39	+++	370	+++	319	+++	287	++–	271	+––	251	+––	221
50	+++	310	+++	269	+++	236	++–	218	+––	201	+––	168
60	+++	265	+++	231	+++	205	++–	189	+––	172	+–– (гель)	142
Ultima Gold AB	+++	529	+++	482	+++	447	+++	419	+++	398	++–	357

Примечания.
* +++ прозрачный гомогенный раствор; ++– - слабое помутнение раствора, опалесценция; +–– - значительное помутнение раствора; ––– - сильное помутнение раствора (молоко).
** Для приготовления СОБР из водно-толуольных смесей желательно не использовать объемы водных проб от 1 до 2 мл во избежание возможного расслоения счетного образца.

Табл.3. *Свойства СОБР с различным содержанием Тритона X-100, приготовленных с добавлением возрастающего количества* ***1 М HNO_3*** *(параметр гашения tSIE, прозрачность, гомогенность).*

Содержание Тритона X-100, %	+1 мл 1 М HNO_3		+2 мл 1 М HNO_3		+3 мл 1 М HNO_3	
	Прозрачность	tSIE	Прозрачность	tSIE	Прозрачность	tSIE
20	++–	388	+––	328	–––	304
31	+++	275	++–	219	+––	193
39	+++	224	+++	158	+––	140
50	+++	184	+++	120	++– вязкий	93
60	+++	150	+++	95	++– вязкий	69
Ultima Gold AB	+++	423	+++	376	+++	346

практически не отличались от «толуольных» (данные не приводятся).

Тестирование «лабораторных» сцинтилляционных коктейлей на модельных радионуклидных смесях

Ранее было отмечено, что СПО «Spectra Dec/LiquidMaster», установленное на ЖС оборудовании предприятий России, базируется на аналитической базе, построенной, главным образом, с использованием фирменного сцинтилляционного коктейля Ultima Gold AB. В связи с этим необходимо выяснить, можно ли приготовленный «лабораторный» сцинтилляционный коктейль в случае необходимости заменить на фирменный. Для этого из образцовых радионуклидных растворов с известной активностью были приготовлены модельные смеси в «лабораторных» коктейлях и в Ultima Gold AB. Смеси измеряли на ЖСС «Tri-Carb 4810», полученные спектры обрабатывали с помощью СПО «SpectraDec». Результаты тестирования представлены в табл.4.

На рис.1–5 представлены полученные на ЖСС «Tri-Carb 4810» спектры модельных радионуклидных смесей в коктейлях различного состава и их расшифровка с помощью СПО «SpectraDec».

Как видно из приведенных данных, представленных в табл.4 и на рис.1–5, СПО «SpectraDec/LiquidMaster» позволяет достаточно корректно обрабатывать спектры модельных радионуклидных смесей, приготовленных на основе «лабораторных» сцинтилляционных коктейлей, измеренные на приборах, откалиброванных на фирменных коктейлях.

Сцинтилляционные коктейли для экстракционной технологии извлечения радионуклидов, приготовленные в «лабораторных» условиях

Несмотря на уникальные возможности жидкосцинтилляционного метода определения радиоактивности, ему присущ один существенный недостаток – низкое разрешение α-пиков

Табл.4. *Результаты тестирования модельных радионуклидных смесей, измеренных в приготовленных «лабораторных» и фирменном Ultima Gold AB коктейлях.*

СОБР	Состав коктейля	Состав смеси	Найденная активность, Бк	Известная активность, Бк
1	Толуол+тритон 50% + 7 мл H_2O	^{210}Pb ^{210}Bi ^{210}Po ^{226}Ra	9,4±1,1 9,0±1,0 6,0±0,9 17,0±2,0	9,0±0,5 9,0±0,5 6,0±0,3 17,0±1,0
2	Ultima Gold AB + + 3 мл 1М HNO_3	^{210}Pb ^{210}Bi ^{210}Po ^{226}Ra	9,5±1,0 9,0±1,0 5,8±0,8 17,0±1,8	9,0±0,5 9,0±0,5 6,0±0,3 17,0±1,0
3	Толуол+тритон 31% + 4 мл H_2O	^{3}H	215±37	240±20
4	Ultima Gold AB% + + 7 мл H_2O	^{3}H	255±33	240±20
5	Толуол+тритон 39% + + 3 мл H_2O	^{3}H ^{14}C ^{90}Sr/^{90}Y ^{241}Am	170±25 220±20 72±7 11±1	185±15 210±10 70±2 12,0±0,4
6	Толуол+тритон 39%	^{125}I ^{90}Sr/^{90}Y ^{241}Am	31±4 44±5 6±1	30,0±0,3 45,0±1,4 6,0±0,2
7	Ксилол+тритон 39% + + 4 мл H_2O	^{3}H ^{241}Am	153±20 7,5±0,8	160±14 7,0±0,2

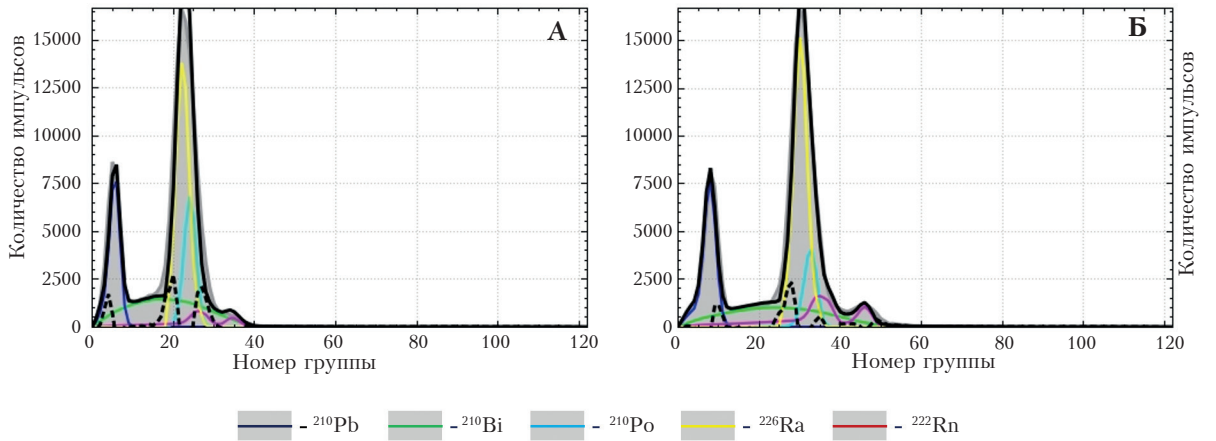


Рис.1. *Расшифровка спектров ^{226}Ra + ДПР, полученных на ЖСС «Tri-Carb 4810» в «лабораторном» коктейле: толуол + тритон 50% + 7 мл H_2O (А) и фирменном Ultima Gold AB + 3 мл 1М HNO_3 (Б) (СОБР 1 и 2 таблицы 4, соответственно).*

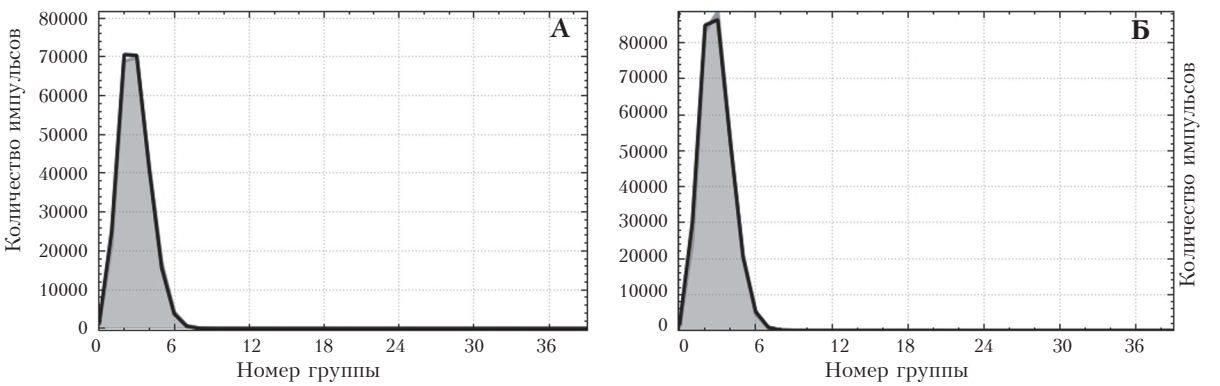


Рис.2. *Расшифровка спектров трития, полученных на ЖСС «Tri-Carb 4810» в «лабораторном» коктейле: толуол + тритон 31% + 4 мл H_2O (А) и фирменном Ultima Gold AB + 7 мл H_2O (СОБР 3 и 4 таблицы 4, соответственно).*

по сравнению с традиционной полупроводниковой α-спектрометрией, что вызывает значительные затруднения при качественном и количественном определении α-излучающих радионуклидов с близкими энергиями.

В настоящее время известно несколько способов улучшения разрешения сцинтилляционных α-пиков, но для стандартного ЖС оборудования единственно приемлемым методом является получение счетного образца с минимальным гашением. Процесс получения такого счетного образца предполагает применение жидкостной экстракционной технологии с использованием либо фирменных коммерческих экстрактивных

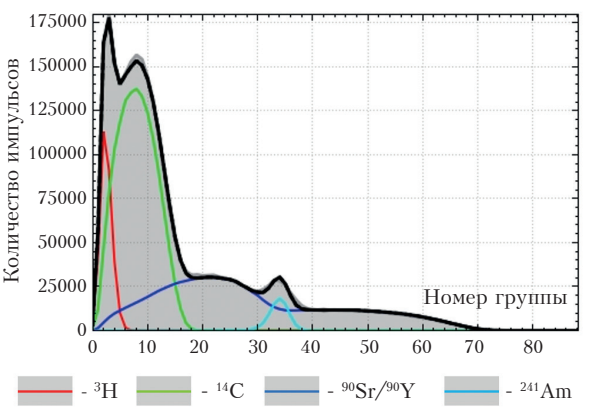


Рис.3. *Расшифровка спектра модельной радионуклидной смеси $^{3}H+^{14}C+^{90}Sr/^{90}Y+^{241}Am$, полученного на ЖСС «Tri-Carb 4810» в «лабораторном» коктейле: толуол + тритон 39% + 3 мл H_2O (СОБР 5 таблицы 4, соответственно).*

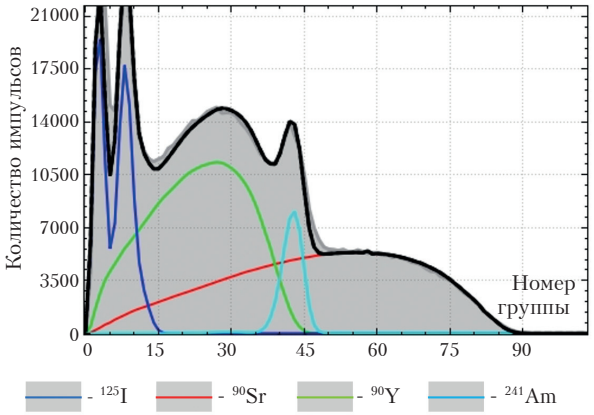


Рис.4. *Расшифровка спектра модельной радионуклидной смеси $^{90}Sr/^{90}Y+^{125}I+^{241}Am$, полученного на ЖСС «Tri-Carb 4810» в «лабораторном» коктейле: толуол + тритон 39% (СОБР 6 таблицы 4, соответственно).*

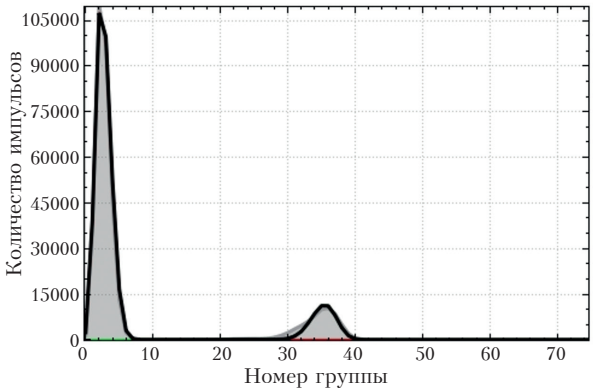


Рис.5. *Расшифровка спектра модельной радионуклидной смеси ^{3}H + ^{241}Am, полученного на ЖСС «Tri-Carb 4810» в «лабораторном» коктейле: ксилол+тритон 39% + 4 мл H_2O (СОБР 7 таблицы 4, соответственно).*

сцинтилляторов, либо приготовленных из соответствующих реагентов в лабораторных условиях, что позволяет селективно извлекать определяемые радионуклиды в объем сцинтиллятора с одновременным получением счетного образца. Экстракционная технология не только убыстряет и облегчает процесс концентрирования α-излучающих радионуклидов из сложных смесей, но и способствует значительному уменьшению гашения счетного образца, вследствие чего существенно улучшается разрешение сцинтилляционных α-пиков. Это позволяет применять подход расшифровки сложных спектров к анализу сложных смесей радионуклидов с близкими энергиями излучения, базирующийся на СПО «SpectraDec/LiquidMaster».

Ранее были коммерчески доступны готовые к применению экстрактивные сцинтилляторы фирмы «ETRAC» (OAK RIDGE, USA) такие как «ALPHAEX», «URAEX», «THOREX», «POLEX», «RADAEX», в состав которых входят ароматические растворители, жидкие органические экстрагенты и сцинтилляторы. Эти экстрактивные сцинтилляторы позволяли селективно выделять из соответствующих сред изотопы урана, тория, плутония, полония, радия. В настоящее время они не доступны.

В данный момент в ГИЦ ПВ ведутся работы по разработке «лабораторных» аналогов вышеперечисленных реагентов. Направления проводимых работ:

1) Приготовление аналога «ALPHAEX» с применением толуола, сцинтилляторов ППО и ПОПОП и Ди-(2-этилгексил) фосфорной кислоты (Д2ЭГФК) в качестве экстрагирующей молекулы. Этот коктейль является великолепным экстрагирующим коктейлем для извлечения актинидов U, Th, Pu, Am и Cm из соответствующих кислых растворов. Обычно экстракцию U, Th, Pu проводят из 0,5–1 М растворов HNO_3, а трехвалентных изотопов Am, Cm из разбавленных растворов HNO_3 (0,005–0,01 М).

2) Имитация «URAEX» вышеописанным набором реагентов, где в качестве экстрагента использован три-н-октиламин (ТОА) в сульфатной форме. Такой коктейль предназначен, в основном, для извлечения изотопов урана из сернокислых растворов в широком диапазоне концентраций (от 10–5 до 1 М).

3) Использование вместо «THOREX» указанной смеси толуола, сцинтилляторов и экстрагента 1-нонилдециламина (NDA) в сульфатной форме. Такой коктейль предназначен, в основном, для извлечения изотопов Th из сернокислых растворов.

4) Приготовление коктейля, аналогичного фирменному «POLEX». В нем использован перечисленный ранее состав: толуол+ППО+ +ПОПОП, а в качестве экстрагирующей молекулы используется триоктилфосфиноксид (ТОФО). Коктейль, в основном, предназначен для извлечения из кислых растворов изотопов полония. Исключительную селективность к полонию коктейль проявляет в среде 7 М H_3PO_4 – 0,01 М HCl.

5) Разработан и уже внедрен в производственную практику ГИЦ ПВ метод извлечения радиоактивного инертного газа радона (^{222}Rn). Радон с высоким выходом извлекается из водных сред в толуол, а затем смешивается с коктейлем состава толуол+ ППО+ПОПОП. Здесь экстрагентом является непосредственно сам толуол. На рис.6 представлен типичный спектр ^{222}Rn в равновесии с дочерними продуктами распада (ДПР), выделенный по вышеописанному методу, и его расшифровка программой «SpectraDec».

Отличительной чертой вышеописанных «лабораторных» экстрактивных коктейлей является то обстоятельство, что им не нужно с водными пробами образовывать гомогенный раствор (или эмульсию), а, наоборот, необходима гетерогенная фаза, в которой в верхнюю (органическую) фракцию извлекаются радионуклиды.

Выводы

В настоящее время метод определения радиоактивных изотопов с помощью жидкосцинтилляционной спектрометрии испытывает ряд объективных трудностей, одной из которых является проблема с основным расходным материалом – сцинтилляционным коктейлем. Основной применявшийся в России фирменный коктейль марки Ultima Gold AB можно приобрести только по параллельному импорту и по неоправданно завышенным ценам, сильно увеличив стоимость каждого анализа.

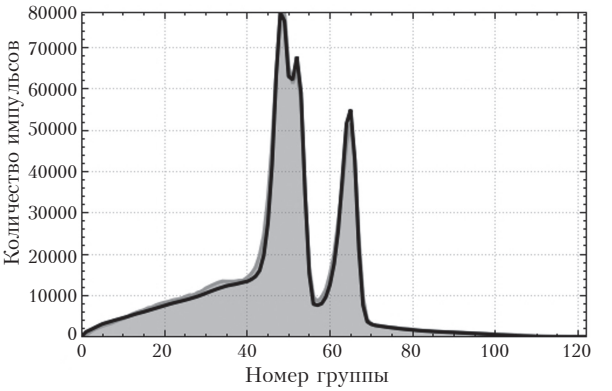


Рис.6. *Расшифровка спектра радионуклидной смеси ^{222}Rn+ДПР, полученного на ЖСС «Tri-Carb 4810» при использовании экстракции радона в «лабораторный» коктейль: толуол+ППО+ПОПОП.*

Попытки отечественных производителей создать сцинтилляционные коктейли, приближенные по свойствам к фирменному (совместимость с водой 1:1, оптимальное гашение СОБР, низкое значение фона) на сегодняшний день не привели к успеху. Исследованные в нашей организации образцы коктейлей, приготовленные другими лабораториями, показали изначально высокую степень гашения, огромную люминесценцию и несовместимость с водой, что затрудняет их использование для ЖС спектрометрии.

В данной работе авторы описали рецепты приготовления коктейлей в лабораторных условиях из имеющихся доступных реагентов и представили результаты их тестирования. Основными ингредиентами этих коктейлей являются: ароматический растворитель толуол (ксилол), эмульгатор марки Тритон Х-100 в различных концентрациях, первичный (ППО) и вторичный (ПОПОП) сцинтилляторы.

Показано, что хотя ни один из приготовленных коктейлей по своим характеристикам (совместимость с водной пробой, гашение) не может конкурировать с фирменным Ultima Gold AB, они могут быть успешно использованы для проведения жидкосцинтилляционных измерений. Коктейли с содержанием Тритона

Х-100 31–39% могут смешиваться с 3–5 мл водной (кислотной) пробы с сохранением прозрачности и гомогенности счетного образца с приемлемым уровнем гашения, что является достаточным для проведения полноценного ЖС анализа. Спектры, полученные в этих коктейлях, после измерения на ЖС радиометрах, обрабатываются программой расшифровки спектров «SpectraDec» не хуже, чем измеренные в коктейле Ultima Gold AB.

Параллельно авторами ведутся исследования по разработке экстрактивных сцинтилляторов. Показано, что для экстракционной технологии извлечения радионуклидов из водных (кислотных) сред приготовленные в лабораторных условиях коктейли на основе толуола, сцинтилляторов и органических экстрагентов приемлемы в качестве готовых к применению в ЖС спектрометрии в качестве экстрактивных сцинтилляторов. Результаты этих исследований предполагается опубликовать в ближайшее время.

Литература

1. **S.V. Belanov, I.A. Kashirin, S.V. Malinovsky, «Method for Identifying Radionuclides in Probes Using a Liquid Scintillation Sensor», PCT/RU98/00372 (12.11.98).**
2. **Беланов С.В., Каширин И.А., Малиновский С.В., Егорова М.Е., Ефимов К.М., Тихомиров В.А., Соболев А.И. «Способ идентификации радионуклидов с помощью жидкосцинтилляционного счетчика». Пат. 2120646 (приоритет от 08.12.97).**
3. **Беланов С.В., Каширин И.А., Малиновский С.В., Ермаков А.И., Ефимов К.М., Тихомиров В.А., Соболев А.И. «Способ идентификации радионуклидов с помощью жидкосцинтилляционного счетчика». Пат. 2132074 (приоритет от 03.04.98).**
4. **I.A. Kashirin, A.I. Ermakov, S.V. Malinovskiy, S.V. Belanov, Yu.A. Sapozhnikov, K.M. Efimov, V.A. Tikhomirov, A.I. Sobolev, «Liquid scintillation determination of low level components in complex mixtures of radionuclides. Appl.Rad.Isotopes, 53, 2000, p. 303-308.**
5. **Каширин И.А., Малиновский С.В., Соболев А.И. и др. Способ идентификации альфа-излучающих радионуклидов в пробах с использованием жидкостного сцинтилляционного счетчика. Патент на изобретение РФ № 2191409 (приоритет от 26.10.2000).**
6. **Ермаков А.И., Малиновский С.В., Каширин И.А. и др. Жидкосцинтилляционная β-α-спектрометрия//Атомная энергия. 2002. Т. 92, вып. 1. С. 68-75.**
7. **S.V. Malinovsky, I.A. Kashirin, A.I. Ermakov, S.V. Belanov, A.I. Sobolev, V.A. Tikhomirov. Mathematical Aspects of Decoding Complex Spectra Applied to LSC. LSC-2001, Advances in Liquid Scintillation Spectrometry, RADIOCARBON, 2002, pp. 127-135.**
8. **S.V. Malinovsky, I.A. Kashirin, A.I. Ermakov, A.I. Sobolev, L.L. Kaihola, A.A. Fedotov., V.A. Tikhomirov. New Software for Analyzing Complex Spectra Obtained with Ultra Low Level Liquid Scintillation Spectrometer «Quantulus». LSC 2001, Advances in Liquid Scintillation Spectrometry, RADIOCARBON, 2002, pp. 119-126.**
9. **Малиновский С.В., Каширин И.А., Беланов С.В., Соболев А.И., Тихомиров В.А. Универсальный программный комплекс сбора и обработки спектрометрической информации. VII ежегодный семинар «Спектрометрический анализ. Аппаратура и обработка данных на ПЭВМ», 20-24 ноября 2000 г., Обнинск: изд. ГЦИПК. С. 159-170.**
10. **Малиновский С.В., Каширин И.А., Ермаков А.И., Соболев А.И, Тихомиров В.А. Спектрометрическое универсальное программное обеспечение «RadSpectraDec». XI ежегодный семинар «Спектрометрический анализ. Аппаратура и обработка данных на ПЭВМ», ноябрь 2004, Обнинск: изд. ГЦИПК, 2005.**
11. **Малиновский С.В., Каширин И.А. Жидкосцинтилляционная спектрометрия. Современное состояние//АНРИ. 2024. № 2(117).**

The Problems of Liquid Scintillation Spectrometry in Modern Conditions. Scintillation Cocktail

Gonchar Yuriy, Gudymenko Natalya, Kashirin Igor, Gudymenko Vasiliy, Malinovskiy Sergey
(Limited liability company «The main checkpoint testing centre of drinking water», Moscow, Russia)

Abstract. **The main problems of liquid scintillation spectrometry in the current modern conditions are presented. The possibility of working on LC radiometers using scintillation cocktails created on the basis of reagents available in Russia was analyzed. Comparative results of testing model radionuclide mixtures in proprietary (UltimaGold AB, INSTA-FLUOR) scintillation cocktails and those prepared in laboratory conditions based on the aromatic solvent toluene (xylene) are shown.**

Keywords: *liquid scintillation spectrometry, scintillation cocktail, extraction technology for radionuclide analysis.*

Ю.Н.Гончар (к.т.н., генеральный директор), Н.О.Гудыменко (зав. ЛРИ), И.А.Каширин (к.х.н. ст. эксперт), В.А.Гудыменко (к.б.н., эксперт), С.В.Малиновский (к.ф.-м.н., ст. эксперт)
ООО Главный контрольно-испытательный центр питьевой воды (ООО «ГИЦ ПВ»), г. Москва
Контакты: тел. +7 (909) 691-59-15; 79096915915@yandex.ru

DOI: 10.37414/2075-1338-2024-119-4-13-27 УДК 621.383.523

Твердотельные детекторы оптических сигналов и радиации

Часть 1.1. Обзор конструкций и характеристик детекторов

В первой части обзора рассматривается история разработок твердотельных детекторов и особенности их конструкций. Основное внимание уделяется лавинным фотодиодам и кремниевым фотоумножителям, которые являются наиболее чувствительными и потому наиболее востребованными твердотельными детекторами малофотонных оптических сигналов и радиации.

С.Л.Виноградов
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва
НПП «Доза», г. Зеленоград

Ключевые слова:
фотоэффект, фотодиод, лавинный фотодиод (ЛФД), гейгеровский ЛФД, однофотонный ЛФД, кремниевый фотоумножитель.

В современном мире твердотельные детекторы оптических сигналов окружают нас практически во всех сферах научно-технической деятельности, на производстве и в быту. Сложно перечислить даже наиболее важные области их применений: системы волоконно-оптической связи современного интернета и компьютерных кластеров на основе гигагерцовых фотодиодов, системы автономной навигации с лазерными дальномерами (лидарами) на основе лавинных фотодиодов и матриц, системы микроскопии, мультиспектральной астрономии, аэрофотосъемки и космической картографии на основе матричных фотоприемников большой площади с высоким пространственным разрешением, а также разнообразные электронные устройства для повседневной жизни от датчиков задымления и ИК-пультов до смартфонов с несколькими матричными фотосенсорами и однофотонными лидарными детекторами автофокуса.

Однако кроме непосредственного детектирования сигналов оптического диапазона от ультрафиолетовой до дальней ИК области, твердотельные детекторы широко применяются для регистрации радиационных потоков и частиц высоких энергий в диапазоне от 10 эВ мягкого рентгена до 10^{20} эВ (Экзо-эВ) космических частиц. При этом фотодетектор обычно работает в паре со сцинтиллятором, в котором частица вызывает вспышку света с числом фотонов пропорциональным ее энергии. Таким образом решаются основные задачи радиационных измерений: радиометрии (измерение активности, т. е. интенсивности потока радиации) и калориметрии (измерение энергии частиц), а также проводятся времяпролетные измерения. Кроме того, для идентификации заряженных частиц высокочувствительные матричные фотодетекторы используются в паре с радиатором, в материале которого возникает Черенковское излучение.

В первой части обзора рассматривается история разработок твердотельных детекторов с акцентом на лавинные фотодиоды и кремниевые фотоумножители – наиболее чувствительные и потому наиболее востребованные детекторы малофотонных оптических сигналов и радиации.

Во второй части обзора планируется рассмотреть основные параметры фотодетекторов, обобщенные критерии качества и эффективности детектирования (отношение сигнал/шум), а также конкурентность разных типов детекторов на основе этих критериев.

В третьей части обзора планируется обсудить современное состояние дел по твердотельным детекторам, проблемы, возникающие при разработке, а также решения, тенденции и перспективы развития, примеры сопоставления конкретных детекторов по критериям качества.

В четвертой части обзора планируется рассмотреть ряд практических примеров применения фотодетекторов, в первую очередь, кремниевых фотоумножителей, в системах ядерной медицины и радиационных измерениях.

История разработок твердотельных фотодетекторов

Фотопроводимость, фотоэффект, фотодиод (начальный период до 1960-х годов)

Первые твердотельные фотодетекторы появились около 150 лет назад. В 1873 году Уиллоуби Смит обнаружил эффект фотопроводимости (зависимость сопротивления образца от освещения) в сером селене – полупроводнике p-типа с шириной запрещенной зоны 1,8 эВ. В 1877 году У.Г. Адамсом и Р.Е. Деем были опубликованы результаты исследований этого эффекта [1]. Вскоре Вернер фон Сименс разработал первые коммерческие фотодатчики – селеновые фоторезисторы. Уже в 1878 Александр Белл предложил, а в 1880 году разработал «фотофон» для воспроизведения звука путем модуляции света от вибрирующего зеркала на селеновом фоторезисторе, что можно считать рождением систем оптической связи на основе фотодетекторов.

Исследования фотоэффекта, начиная с его открытия в 1887 году А.Г. Столетовым, и, независимо, Генрихом Герцем и квантово-механического объяснения Альбертом Эйнштейном в 1905 году, заложили фундамент для последующих разработок основных типов как вакуумных, так и полупроводниковых фотодетекторов.

По истории и физике этих разработок много подробной и интересной литературы, в частности, по вакуумным фотоэлектронным умножителям (ФЭУ) можно порекомендовать статьи Б.К. Лубсандоржиева [2,3], а по лавинным фотодиодам – обзоры Эдуарда Фишера [4], Дитера Ренкера [5], В.Э. Шубина и Д.А. Шушакова [6], а также монографию З.Я. Садыгова [7].

С 1940-х годов начались активные разработки ключевых типов полупроводниковых фотодетекторов, когда было установлено, что кремний и германий являются предпочтительными материалами с точки зрения фотоэлектрических свойств и качества материала. Для них были разработаны процессы легирования примесями и создания положительных (p-типа) и отрицательных (n-типа) областей проводимости.

Наиболее известны успехи компании Bell Laboratories, в первую очередь связанные с изобретением и разработкой кремниевого транзистора в 1947 г. Однако одновременно там шли разработки и фотоэлектрических приборов: в 1941 г. Расселом Олем было изобретено «светочувствительное электрическое устройство» – кремниевый фотодиод на основе плоского p-n-перехода, а в 1948 г. Джон Шив, изучая транзистор, изобрел фототранзистор.

В 1950-х годах фотодиоды различных конструкций изучались при высоких обратных напряжениях, и удалось обнаружить ряд сильнополевых эффектов, включая лавинное умножение носителей заряда. Это привело к изобретению лавинного фотодиода (ЛФД) Дзюнъити Нишизавой в 1952 году [8].

Следующие два раздела посвящены истории разработок полупроводниковых, в первую очередь, кремниевых детекторов, использующих эффект лавинного умножения носителей заряда. Общая цель этих работ – достичь максимальной пороговой чувствительности, возможности детектировать как малофотонные импульсы света, так и отдельные фотоны и, более того, разрешать число фотонов в импульсе.

Разработки лавинных фотодиодов 1960–1990-х годов

Главной проблемой при разработке ЛФД была необходимость обеспечить наиболее равномерный лавинный пробой в его активной области, иначе на неоднородностях легирования и дефектах, неизбежных при имевшемся технологическом уровне, возникал пробой микроплазменного типа, часто ведущий к выгоранию этой области.

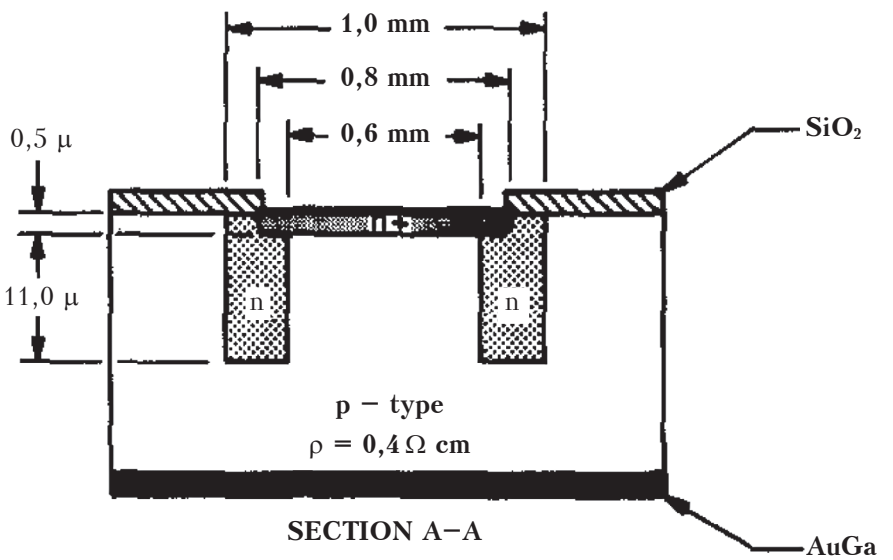


Рис.1. *Первая конструкция ЛФД с охранным кольцом, известная как ЛФД Р. Хайтца [10].*

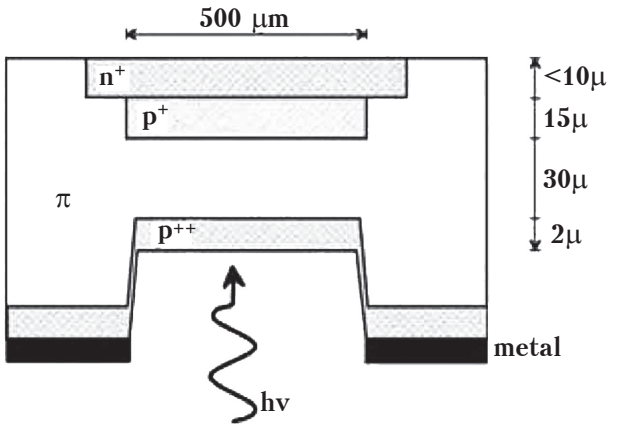


Рис.2. *Первая конструкция ЛФД с проникновением поля, известная как ЛФД Р. Макинтайра [13].*

Первой успешной конструкцией ЛФД с однородным пробоем стала планарная диодная структура с мелкой диффузией фосфора по центру, которая образует лавинный p-n-переход в подложке p-типа и с глубокой диффузией фосфора по краям, которая образует защитное кольцо, как показано на рис.1. Такой ЛФД был разработан Рональдом Хайтцем с коллегами в 1963 г. [9,10]. С тех пор планарная конструкция стала основой большинства разработок ЛФД вплоть до настоящего времени.

Главными направлениями разработок кремниевых ЛФД начального периода были повышение их пороговой чувствительности вплоть до однофотонной, что требовало повышения коэффициента лавинного умножения, а также общее повышение квантовой эффективности с расширением спектрального диапазона чувствительности, особенно в ИК область, для чего требовалось увеличение толщины активного слоя, ответственного за поглощение фотонов и собирание рожденных светом электронов и дырок.

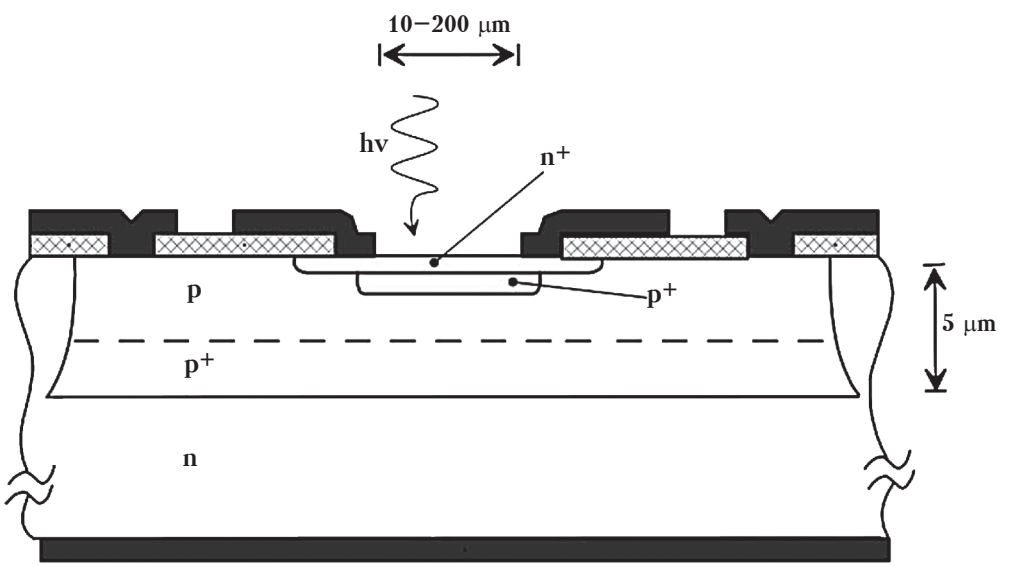


Рис.3. *Конструкция ЛФД с мелким p-n-переходом, известная как ЛФД С. Ковы, а также как однофотонный ЛФД (Single Photon APD, SPAD) [15].*

Эти цели были достигнуты в другой планарной конструкции, известной как ЛФД с проникновением поля. Она была разработана в начале 1970-х годов в компании Radio Corporation of America (RCA) Робертом Макинтайром, Яном Конради и Полом Уэббом [11-13]. Вместо защитного кольца краевой пробо́й подавлялся частичным перекрытием приповерхностных слоев n+ и p+, образуя лавинную область только в зоне их перекрытия. Область поглощения света имела большую толщину (около 50 мкм и более), которая обеспечивала высокую квантовую эффективность ЛФД, особенно в видимом и ближнем ИК-диапазоне (рис.2).

Эта конструкция ЛФД, работающая в Гейгеровском режиме с активным гашением пробоя, стала универсальным однофотонным детектором за счет широкого спектрального диапазона (практически максимальный для кремния) и рекордной эффективности детектирования ~ 75% (на длине волны максимальной чувствительности 630 нм). На основе этой конструкции с улучшенным профилем поля (известная как SLIK APD) компаниями EG&G, Perkin-Elmer и Excelitas последовательно, как наследниками RCA, более 30 лет выпускался очень востребованный на мировом рынке счетчик фотонов Single Photon Counting Module SPCM-AQR Series [14].

Серьезным конкурентом SLIK APD стала разработка Серджио Ковы и его группы в Миланском политехническом университете, в которой на подложке n-типа выращивался тонкий эпитаксиальный слой p-типа толщиной несколько микрон, лавинный переход был максимально приближен к фронтальной поверхности, а для подавления краевого пробоя было использовано частичное перекрытие слоев p+ и n+, как в ЛФД Макинтайра (рис.3). Эта конструкция, широко известная как однофотонный ЛФД (Single Photon APD, SPAD), обеспечила намного более высокое однофотонное временное разрешение (менее 100 пс по сравнению с более 500 пс для SLIK APD) и малое напряжение пробоя (около 30 В по сравнению с ~ 150–200 В для SLIK APD) за счет малой толщины активного слоя, а также более высокую чувствительность в синем диапазоне спектра за счет особенностей профиля легирования имплантационного p-n-перехода у фронтальной поверхности.

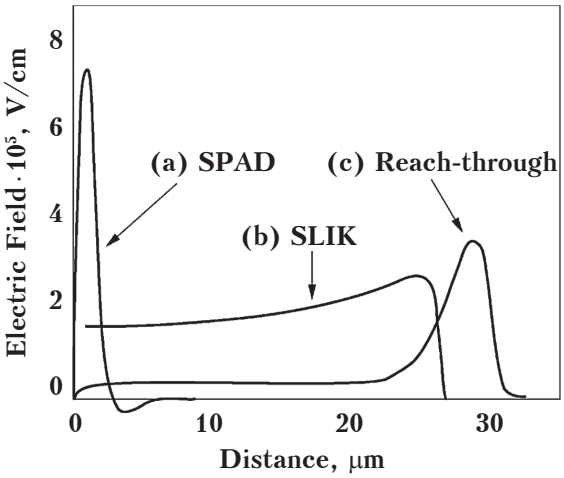


Рис.4. *Профиль электрического поля в конструкциях ЛФД: a) SPAD, b) SLIK, c) ЛФД с проникновением поля (Reach-through) [14].*

Главные фотодетекторные свойства ЛФД в части процессов поглощения фотонов, собирания и лавинного умножения электронов и дырок характеризуются распределением электрического поля по глубине ЛФД от фронтальной поверхности в центральной зоне активной области, как представлено на рис.4.

Как уже отмечалось, начальные разработки ЛФД 1970-х годов были направлены на повышение коэффициента лавинного умножения, что требовало подавления как краевого пробоя, так и неоднородностей легирования и разнообразных структурных дефектов типа дислокаций, из-за которых возникали лавинные пробои микроплазменного типа при пониженном напряжении. Такие неоднородности и дефекты не позволяли создавать ЛФД с размерами чувствительной площадки более

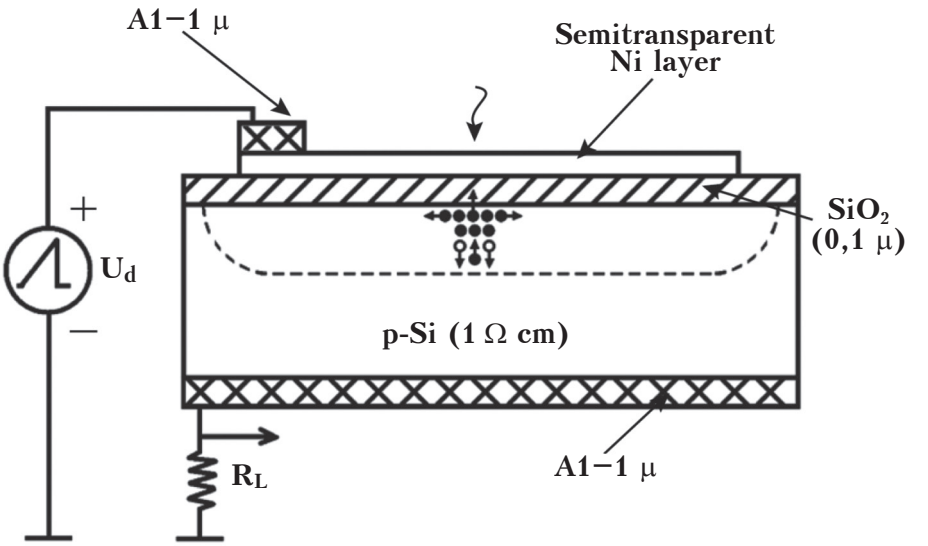


Рис.5. *Конструкция МОП ЛФД на основе структуры металл-диэлектрик (окисел)-полупроводник (как представлено в обзоре [17] по материалам статей [16,21]).*

500 мкм. Неожиданное решение этой проблемы было найдено за счет отказа от p-n-перехода в качестве лавинной области. В 1973 году Норманом Фоссом и Самуэлем Вардом был разработан новый тип ЛФД [16], в котором «впервые было предложено использовать кремниевую структуру MOS (металл-оксид-полупроводник) в качестве альтернативы ЛФД с p-n-переходом. Было выдвинуто предположение, что наличие слоя диоксида кремния с достаточно высоким сопротивлением позволит эффективно стабилизировать (или ограничить) коэффициент умножения лавинного процесса в областях микронеоднородностей полупроводника за счет накопления в таких областях умноженных носителей заряда» [17]. Действительно, такие МОП-ЛФД имели активную площадь до 5 см^2, коэффициент усиления более 20 и отличались от ЛФД на основе p-n-переходов очень равномерной чувствительностью по площади, высокой стабильностью и воспроизводимостью [16].

Вскоре, развивая это направление, в Физическом институте АН СССР начали исследования лавинных процессов в МОП-структурах [18,19]. Был проведен анализ особенностей лавинного умножения носителей заряда в условиях сильной отрицательной обратной связи, которая возникает за счет накопления лавинного заряда на границе раздела Si-SiO$_2$. Удалось показать, что отрицательная обратная связь обеспечивает самостабилизирующийся лавинный процесс с коэффициентом умножения 10^3-10^5, что позволяет создавать МОП-ЛФД большой площади, а также многоэлементные матрицы на их основе [20].

К середине 1990-х годов теоретические и экспериментальные исследования группы В.Э. Шубина в ФИАН сосредоточились на особенностях одноэлектронного лавинного процесса с отрицательной обратной связью. Были обнаружены и измерены одноэлектронные импульсы, разработана вероятностная модель процесса и сформулирована концепция твердотельного фотоумножителя [22-24].

Стоит также отметить особый подход к обеспечению однородности лавинного умножения планарных ЛФД, который применили в компании Advanced Photonix. Они смогли достичь максимально возможной однородности пространственного распределения легирующей примеси n-типа, используя облучение

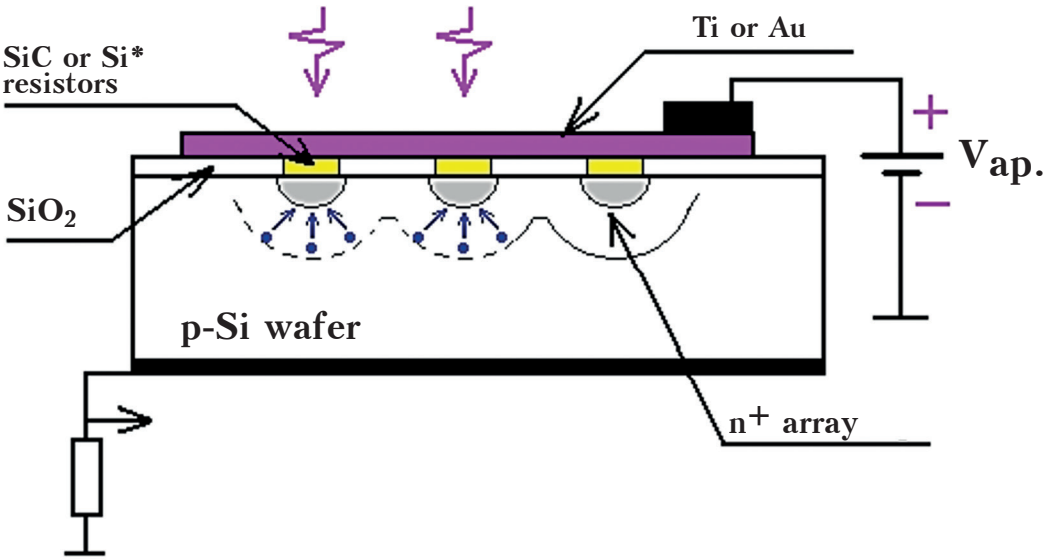


Рис.6. *Конструкция МРП ЛФД на основе структуры металл-резистор-полупроводник [31].*

кремниевых пластин потоком нейтронов таким образом, что в процессе нейтронной трансмутации атом кремния превращается в атом фосфора и становится донором. В 1992 году они успешно разработали ЛФД большой площади (LAAPD) диаметром более 0,5 дюймов [25,26]. В настоящее время Advanced Photonix выпускает самые большие ЛФД на рынке, работающие в пропорциональном (линейном) режиме с коэффициентом усиления до 300.

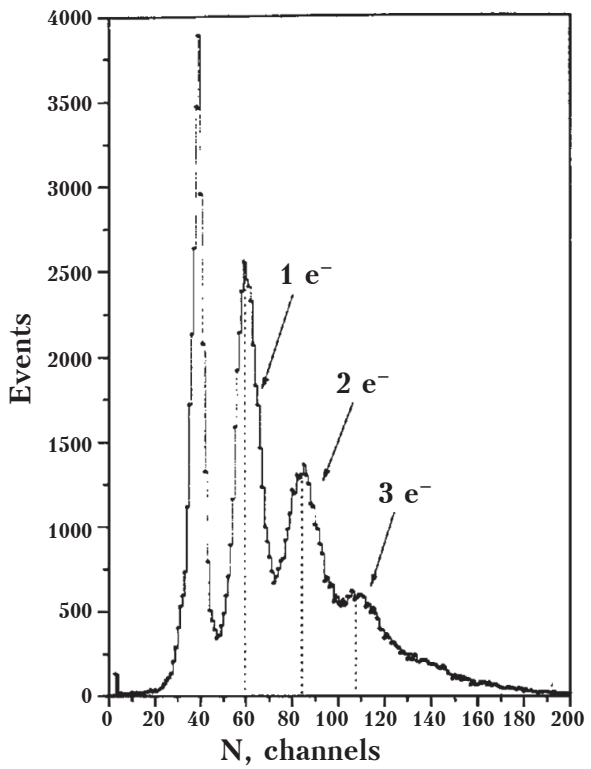


Рис.7. *Гистограмма выходного сигнала (спектр фотоэлектронов) МРП ЛФД при детектировании малофотонного светового импульса с разрешением числа фотоэлектронов [32].*

Разработки кремниевых фотоумножителей 1980–2000-х годов

Вернемся к теме МОП ЛФД и ее развитии в 1980-е годы. МОП ЛФД были способны обнаруживать световой импульс только в течение короткого времени после подачи напряжения смещения, поскольку ток проводимости в них блокировался окислом. Поэтому они могли работать только в режиме запуска от внешнего триггера, синхронизирующего приход светового сигнала и момент нестационарного обеднения приповерхностной области пространственного заряда (ОПЗ) МОП структуры. За микросекунды обеднение ОПЗ переходило в инверсию за счет световой (или темновой) генерации и умножения неосновных носителей (электронов), МОП ЛФД терял чувствительность, и напряжение на нем надо было сбросить для перезапуска процесса детектирования (мертвое время – около миллисекунды).

Этот недостаток был устранен в структуре металл-резистор-полупроводник – МРП ЛФД (MRS APD), разработанной З.Я. Садыговым, В.М. Головиным и их коллегами из ИЯИ и МЭЛЗ. Эта структура могла работать с постоянной чувствительностью при постоянном напряжении смещения, как и все другие типы ЛФД. В первых MRS APD блокирующий слой окисла SiO_2 был заменен на резистивный слой широкозонного полупроводника SiC [27]. Таким образом, MRS APD представлял собой такую же планарную конструкцию, как MOS APD, показанный на рис.5.

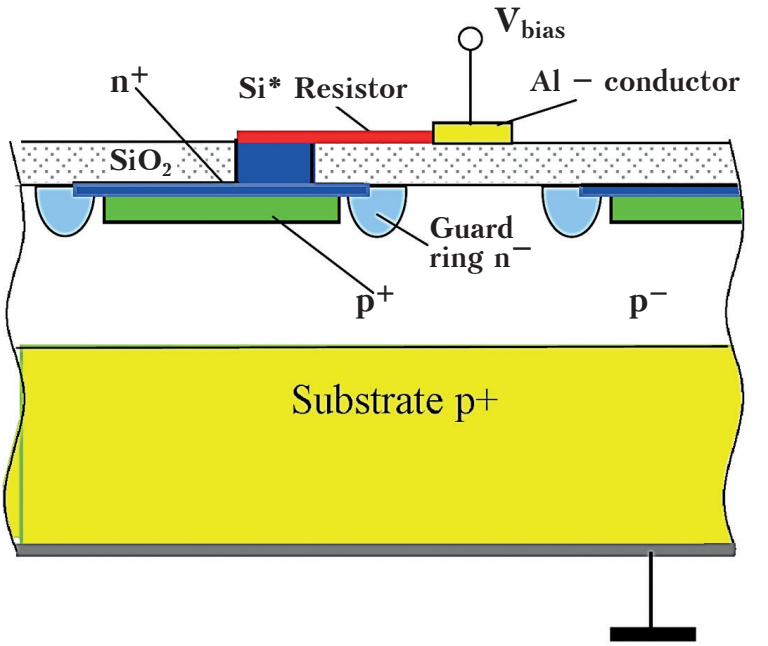


Рис.8. *Конструкция кремниевого фотоумножителя (SiPM) МИФИ/Пульсар [35].*

Второе поколение MRS APD получило весьма оригинальную, принципиально непланарную конструкцию, сильно контрастирующую с установившемся в то время подходом к электрофизической конфигурации лавинных структур с однородным лавинным пробоем. Она была разработана в виде матрицы разделенных p-n-переходов, играющих роль микронеоднородностей, точек локализации лавин, образованных n+ диффузионными зонами размером в несколько микрометров в подложке p-типа, чтобы сфокусировать лавинный пробой в этих точках и предотвратить распространение накопленного лавинного заряда вдоль границы раздела Si-SiC [28-31].

MRS APD обладали высоким коэффициентом умножения ~ $5 \cdot 10^4 - 5 \cdot 10^5$, низким уровнем шумов умножения ~ 30%, быстрым откликом (несколько наносекунд) и могли быть сделаны с большой активной площадью (до 10 мм^2). Более того, они обеспечивали детектирование слабых световых сигналов с разрешением числа фотонов, как показано на рис.7, то есть работали как пропорциональные ЛФД с невероятной для таких приборов пороговой чувствительностью [32,33]. Именно эта возможность привела к широкой известности MRS APD как перспективных фотодетекторов малофотонных импульсов света, в том числе сцинтилляций от радиационных потоков и частиц высоких энергий.

Производство MRS APD в 1990-х годах было освоено Центром перспективных технологий и аппаратов (ЦПТА, Москва) под руководством В.М. Головина. Они выпускались малыми сериями и считались перспективной заменой вакуумным ФЭУ для некоторых международных экспериментов по физике высоких энергий, в первую очередь, в составе сцинтилляторных тайлов для калориметров высокого разрешения в DESY [33,34].

Несмотря на хорошие параметры лавинного умножения, MRS APD имели низкую эффективность детектирования фотонов (photon detection efficiency, PDE), составляющую около 3% [17], и в 2000-х годах работы по этой конструкции в ЦПТА прекратились.

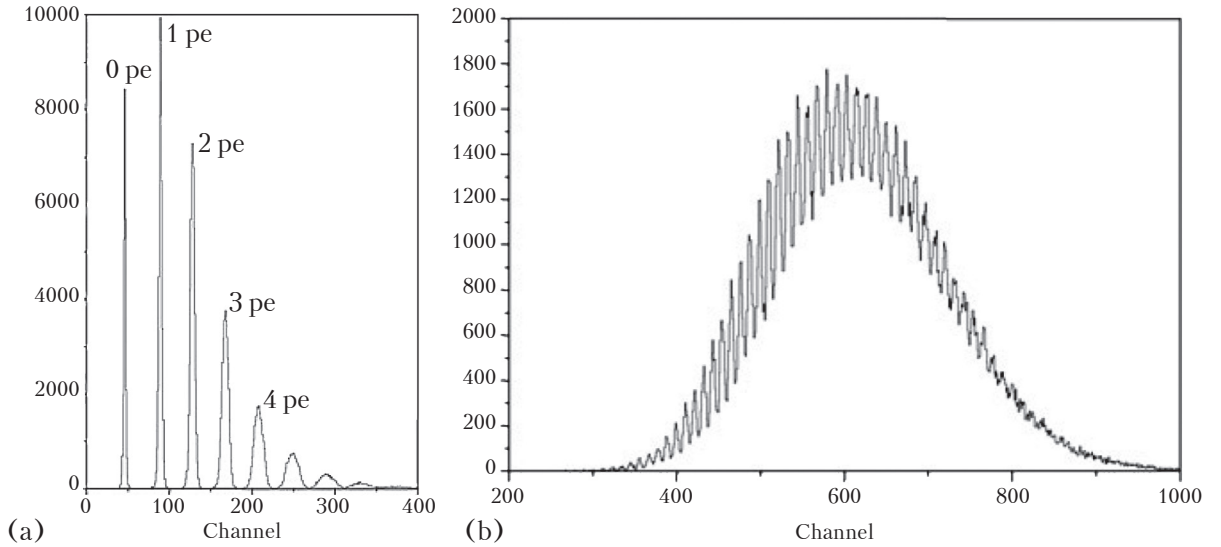


Рис.9. *Гистограмма выходного сигнала (спектр фотоэлектронов) SiPM при комнатной температуре: a) разрешение сигнала со средним числом фотоэлектронов около 1; b) разрешение сигнала со средним числом фотоэлектронов около 46 [36].*

По результатам исследований [24,30,32,33] было видно, что каждый n+ лавинный участок или пиксель MRS APD работает в гейгеровском режиме с пассивным гашением пробоя независимо от других пикселей, что аналогично работе однофотонных гейгеровских ЛФД (SPAD) в составе матриц SPAD. Они отличаются активным гашением пробоя с помощью особой электроники управления напряжением на пикселе, но их лавинная область оптимизирована под решение тех же задач эффективного собирания и умножения фотоэлектронов.

Конструкция лавинного детектора, в которой лавинная область была комбинацией планарного p-n-перехода с заглубленными участками повышенного леширования (аналог диффузионных областей n+ типа MRS APD), а слой с широкозонного полупроводника типа

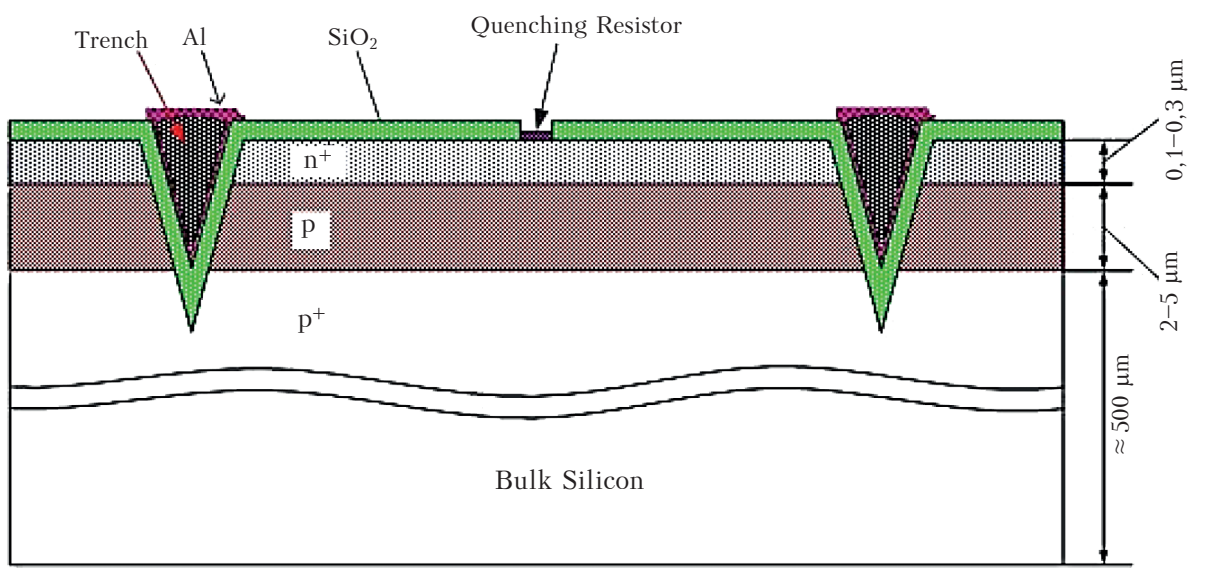


Рис.10. *Конструкция SSPM с тренчами между ячейками, разработанная ЦПТА [39].*

SiC был заменен тонкопленочным поверхностным резистором для гашения пробоя, была запатентована З.Я. Садыговым в 1996 году [17,31].

На основе этой конструкции и конструкции SPAD с мелким p-n-переходом С. Ковы (рис.3) командой Б.А. Долгошеина в сотрудничестве МИФИ с НПО «Пульсар» в начале 2000-х годов был разработан первый планарный ЛФД, известный как кремниевый фотоумножитель (silicon photomultiplier, SiPM) [35-37].

В нем диффузионные зоны n+ были заменены отдельными APD-ячейками, основанными на планарных p-n-переходах. Планарный p-n-переход был дважды защищен от краевого пробоя: охранным кольцом n-типа и частичным перекрытием слоев имплантаций n+ и p+ типов. Лавинные пиксели (ячейки) были подключены к общему электроду через отдельные поликремниевые поверхностные резисторы и работали в ограниченном гейгеровском режиме независимо друг от друга. В качестве поверхностного резистора был нанесен высокоомный слой поликристаллического кремния (рис.8).

Эта конструкция SiPM показала существенно более высокие характеристики, чем MRS APD по коэффициенту умножения (около 10^6), эффективности детектирования (около 15% в видимой области спектра) и по разрешению числа фотонов (рис.9), а также оказалась практичной с технологической точки зрения, воспроизводимой, стабильной и надежной. С середины 2000-х годов такой кремниевый фотоумножитель – SiPM – был признан во всем мире как фотодетектор нового типа с разрешением числа фотонов при комнатной температуре [38].

В 2000-х годах В.М. Головин (ЦПТА в сотрудничестве с компанией Photonique SA) также разработал планарный вариант гейгеровского ЛФД с названием «твердотельный фотоумножитель» (solid state photomultiplier, SSPM) [39]. В нем впервые плоские p-n-переходы на лицевой поверхности были разделены глубокими канавками анизотропного травления кремния (тренчами) для подавления оптических перекрестных помех (кросстолка) между пикселями (рис.10). Эти же канавки выполняли функцию подавления краевого пробоя вместо охранных колец.

К 2007 году оптимизация параметров конструкции SSPM позволила достичь эффективности детектирования фотонов 40% в максимуме чувствительности на длинах волн 550–570 нм при низком напряжении пробоя около 17 В и рабочем напряжении около 25 В, а вероятность кросстолка составляла около 3%.

Однако несмотря на успехи разработок планарных SiPM и SSPM, работы по непланарным конструкциям в развитие подходов, заложенных в MRS APD, продолжались еще до начала 2010-х годов.

Так, ЛФД с дискретным усилением (discrete amplification APD, DAPD) был разработан в группе В.Э. Шубина (ФИАН) в сотрудничестве с компанией Amplification Technologies [40-42]. В них была реализована концепция многоканального ЛФД, работающего в гейгеровском режиме с отрицательной обратной связью на одноэлектронном уровне, как было сформулировано ранее в работе [23]. Каналы лавинного усиления были реализованы в виде пространственно разделенных p-n-переходов микронного размера, аналогично MRS APD [43]. DAPD имели высокую эффективность детектирования фотонов (около 40% в видимой области спектра), высокое быстродействие (ширина одноэлектронного импульса около 1,5 нс) и широкий динамический диапазон (около 4000 пикселей на $мм^2$) [42].

Интересно отметить, что в 2009 году компанией Amplification Technologies был создан

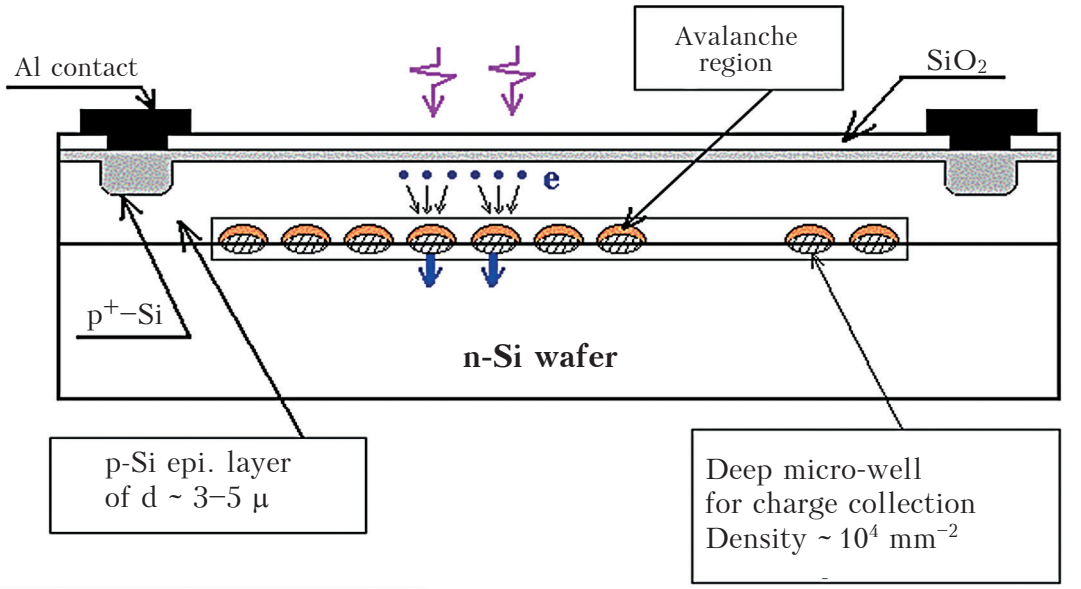


Рис.11. *Конструкция микропиксельного ЛФД с заглубленными пикселями [31].*

первый твердотельный фотоумножитель для ближнего инфракрасного диапазона (NIR DAPD) на основе гетероструктур InGaAs/InP непланарной конструкции. И практически одновременно с этим компанией Princeton Lightwave был разработан планарный InGaAs/InP ЛФД с отрицательной обратной связью за счет поверхностного резистора гашения гейгеровского пробоя (negative feedback APD, NFAD) [44].

В то же время, чтобы превзойти MRS APD и планарные конструкции по эффективности детектирования, З.Я. Садыгов изобрел и разработал (в сотрудничестве с компанией Zecotek) другую оригинальную конструкцию – микропиксельного (МП) ЛФД с заглубленными пикселями [31,45,46]. В ней с фронтальной поверхности были устранены металлические шины и гасящие резисторы, которые занимали много места и блокировали прохождение света внутрь кремния. В результате в этой конструкции обеспечилась геометрическая эффективность почти 100%, а квантовая эффективность в фотодиодном режиме (до лавинного умножения) около 80%. Лавинные области были сформированы из n+ пикселей размером в несколько микрон, заглубленных в эпитаксиальный слой p-типа (рис.11). Эти пиксели усиливают и фокусируют электрическое поле вокруг себя, создавая условия для локального лавинного пробоя, подобно полусферическим n+ диффузионным точкам на поверхности MRS APD. Более того, эти пиксели одновременно являются потенциальными ямами – ловушками для электронов. В этих ямах умноженные электроны накапливаются и удерживаются, а их суммарный заряд уменьшает электрическое поле и подавляет лавинный пробой около данного пикселя.

Небольшой размер (несколько микрон) и, соответственно, высокая плотность пикселей (до 10^4 шт./мм^2) обеспечили очень широкий динамический диапазон детектирования световых импульсов. Действительно, в измерениях на коротких световых импульсах была показана рекордная линейность и ширина динамического диапазона МП APD [47]. Однако пиковое значение PDE в максимуме чувствительности, составляющее около 35%, оказалось примерно в два раза ниже ожидаемого при квантовой эффективности 80%. Кроме того, МП ЛФД показали длительное время

восстановления пикселей – около 300 мкс – из-за медленного процесса ре-эмиссии заряда, захваченного в пикселях – потенциальных ямах, что создает проблему детектирования длинных световых импульсов и постоянных потоков света [47].

Пионерские разработки по MRS APD, выдающиеся показатели эффективности и малофотонного разрешения планарных конструкций SiPM и SSPM, первый опыт успешного применения этих детекторов в физике высоких энергий дали мощный импульс к разработке планарных конструкций кремниевых фотоумножителей в зарубежных центрах и компаниях по оптоэлектронике и к массовому освоению этой технологии детектирования в международных научных коллаборациях.

Зарубежные работы по SiPM продвигались очень активно, и, начиная с 2006 года, публикации по ним представили такие организации, как:

- НТЦ Foundation Bruno Kessler (FBK), Италия – 2006 г. [48];
- Компания Hamamatsu Photonics, Япония – 2007 г. [49];
- Компания SensL, Ирландия – 2008 г. [50];
- Компания ST Microelectronics, Италия – 2008 г. [51,52];
- Компания Radiation Monitoring Devices, США – 2008 г. [53]
- Компания Philips, Германия – 2009 г. (digital SiPM) [54];
- Компания Excelitas (EG&G, Perkin-Elmer), Канада – 2011 г. [55];
- Компания KETEK, Германия – 2012 г. [56].

По результатам разработок в середине 2010-х годов ведущие места на рынке SiPM заняли детекторы Hamamatsu (под названием multipixel photon counter, MPPC), SensL и KETEK. Технологический центр FBK, занимаясь новыми разработками, передал выпуск и продажу в компанию AdvanSiD, которая не стала заметным участником рынка и исчезла. Компании ST Microelectronics, Radiation Monitoring Devices и Excelitas не стали организовывать массовый выпуск детекторов на продажу. Компания Philips стала производить SiPM только для установки в свои позитронно-эмиссионные томографы.

Литература

1. **W.G. Adams, R.E. Day, «The action of light on selenium»,** *Proc. R. Soc. London*, **no. 25, pp. 113-117, 1877. doi: 10.1098/rspl.1876.0024.**
2. **B.K. Lubsandorzhiev, «On the history of photomultiplier tube invention»,** *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, **vol. 567, pp. 236–238, 2006. doi: 10.1016/j.nima.2006.05.221.**
3. **B.K. Lubsandorzhiev, «Evolution of ideas in photon detection»,** *Phys. Part. Nucl.,* **vol. 47, pp. 957–967, 2016. doi: 10.1134/S1063779616060150.**
4. **E.M.D. Fisher, «Principles and Early Historical Development of Silicon Avalanche and Geiger-Mode Photodiodes», in:** *Phot. Count. - Fundam. Appl.*: **InTech, p. 37, 2018. doi: 10.5772/intechopen.72148.**
5. **D. Renker, «Geiger-mode avalanche photodiodes, history, properties and problems»,** *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, **vol. 567, pp. 48–56, 2006. doi: 10.1016/j.nima.2006.05.060.**
6. **V.E. Shubin, D.A. Shushakov, «Photodetectors Avalanche», in:** *Encycl. Opt. Photonic Eng.*, **Second Ed., CRC Press, pp. 1–22, 2015. doi: 10.1081/E-EOE2-120047097.**
7. **Садыгов З.Я., Физика твердотельных фотоэлектронных умножителей, ОИЯИ, Дубна, 2023. URL: http://www1.jinr.ru/Books/Sadygov.pdf. (дата обращения: 14.12.2024).**
8. **J. Nishizawa, P-I-N Photo-Diode, Japan Patent JP1955-8969A, 1952.**
9. **R.H. Haitz, A. Goetzberger, R.M. Scarlett, W. Shockley, «Avalanche Effects in Silicon p-n Junctions. I. Localized Photomultiplication Studies on Microplasmas»,** *J. Appl. Phys.*, **vol. 34, pp. 1581–1590, 1963. doi: 10.1063/1.1702639.**
10. **A. Goetzberger, B. McDonald, R.H. Haitz, R.M. Scarlett, «Avalanche Effects in Silicon p-n Junctions. II. Structurally Perfect Junctions»,** *J. Appl. Phys.*, **vol. 34, pp. 1591–1600, 1963. doi: 10.1063/1.1702640.**
11. **R.J. McIntyre, «The distribution of gains in uniformly multiplying avalanche photodiodes: Theory»,** *IEEE Trans. Electron Devices*, **vol. 19, pp. 703–713, 1972. doi: 10.1109/T-ED.1972.17485.**

12. J. Conradi, «The distribution of gains in uniformly multiplying avalanche photodiodes: Experimental», *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 19, pp. 713–718, 1972. doi: 10.1109/T-ED.1972.17486.
13. P.P. Webb, R.J. McIntyre, J. Conradi, «Properties of avalanche photodiodes», *RCA Rev*. 35, pp. 234–278, 1974.
14. H. Dautet, P. Deschamps, B. Dion at al, «Photon counting techniques with silicon avalanche photodiodes», *Appl. Opt.* vol. 32, pp. 38-94, 1993. doi: 10.1364/ao.32.003894.
15. M. Ghioni, A. Gulinatti, I. Rech et al, «Progress in Silicon Single-Photon Avalanche Diodes», *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electronics*, vol. 13, pp. 852–862, 2007. doi: 10.1109/JSTQE.2007.902088.
16. N.A. Foss, S.A. Ward, «Large area metal oxide semiconductor avalanche photodiodes», *J. Appl. Phys*., vol. 44, pp. 728–731, 1973. doi: 10.1063/1.1662252.
17. Z. Sadygov, A. Sadigov, S. Khorev, «Silicon Photomultipliers: Status and Prospects», *Phys. Part. Nucl. Lett.,* vol. 17, pp. 160–176, 2020. doi: 10.1134/S154747712002017X.
18. N.I. Gol'braikh, A.F. Plotnikov, V.E. Shubin, «Pulse avalanche photodetector based on a metal-insulator-semiconductor structure», *Sov. J. Quantum Electron*., vol. 5, pp. 1435–1436, 1975. doi: 10.1070/QE1975v005n12ABEH012167.
19. A.B. Kravchenko, A.F. Plotnikov, V.E. Shubin, «Feasibility of construction of a pulsed avalanche photodetector based on an MIS structure with stable internal amplification», *Sov. J. Quantum Electron.*, vol. 8, pp. 1086–1089, 1978. doi: 10.1070/QE1978v008n09ABEH010725.
20. N.G. Basov, A.B. Kravchenko, A.F. Plotnikov, V.E. Shubin, «Self-stabilized avalanche process in a metal-dielectric-semiconductor (MDS) structure. Avalanche MDS photodetectors», *Uspekhi Fiz. Nauk*., vol. 134, pp. 748-750, 1981. doi: 10.3367/UFNr.0134.198108l.0748.
21. A.B. Kravchenko, A.F. Plotnikov, Y.M. Popov, V.E. Shubin, «Detection of light with an MIS structure operating under avalanche multiplication conditions», *Sov. J. Quantum Electron*. vol. 11, pp. 473–477, 1981. doi: 10.1070/QE1981v011n04ABEH006850.
22. S. Bogdanov, V. Shubin, D. Shushakov, «The influence of electric field nonstationarity on a process of unit carrier multiplication», *KSF*. vol. 58, pp. 3–10, 1994.
23. D.A. Shushakov, V.E. Shubin, «New solid state photomultiplier» in: M. Razeghi, Y.-S. Park, G.L. Witt (Eds.), *SPIE Optoelectron. Integr. Circuit Mater. Physics, Devices*, SPIE, p. 544, 1995. doi: 10.1117/12.206900.
24. D.A. Shushakov, V.E. Shubin, «New avalanche device with an ability of few-photon light pulse detection in analog mode», in: G.S. Mecherle (Ed.), *Free. Laser Commun. Technol. VIII, SPIE*, pp. 173–183, 1996. doi: 10.1117/12.238418.
25. G. Szecesnyi-Nagy, «The Avalanche Photodiode – A Promising Low Light Level Detector for Astronomical Photometry», *Int. Astron. Union Colloq*., vol. 136, pp. 160–168, 1993. doi: 10.1017/S025292110000751X.
26. D. Renker, E. Lorenz, «Advances in solid state photon detectors», *J. Instrum.*, vol. 4, pp. 04004. doi: 10.1088/1748-0221/4/04/P04004.
27. A. Gasanov, V. Golovin, Z. Sadygov, N. Yusipov, «An avalanche detector on the basis of metal-resistive layer-semiconductor», *Sov. Tech. Phys. Lett*. vol. 14, p. 313, 1988. URL: https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/31222. (дата обращения: 14.12.2024).
28. A. Gasanov, V. Golovin, Z. Sadygov, N. Yusipov, «Effect of local inhomogeneities in a semiconductor substrate on the characteristics of avalanche photodetectors», *Sov. Tech. Phys. Lett*. vol. 16, p. 14. URL: https://journals.ioffe.ru/articles/25162 (дата обращения: 14.12.2024).
29. Z.Y. Sadyigov, A.G. Gasanov, N.Y. Yusipov et al, «Investigation of the possibility of creating a multichannel photodetector based on the avalanche MRS-structure», in: A.L. Mikaelian (Ed.), *SPIE Proc. Opt. Mem. Neural Networks*, pp. 158–168, 1991. doi: 10.1117/12.50424.
30. Z.Y. Sadygov, I.M. Zheleznykh, N.A. Malakhov et al, «Avalanche semiconductor radiation detectors» in: *Third Eur. Conf. Radiat. Its Eff. Components Syst.*, IEEE, pp. 460–464, 1996. doi: 10.1109/RADECS.1995.509820.
31. Z. Sadygov, A. Olshevski, I. Chirikov et al, «Three advanced designs of micro-pixel avalanche photodiodes: Their present status, maximum possibilities and limitations», *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip*. vol. 567, pp. 70–73, 2006. doi: 10.1016/j.nima.2006.05.215.
32. A.V. Akindinov, A.N. Martemianov, P.A. Polozov et al, «New results on MRS APDs», *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip*., vol. 387, pp. 231–234, 1997. doi: 10.1016/S0168-9002(96)01201-6.
33. G. Bondarenko, B. Dolgoshein, V. Golovin et al, «Limited Geiger-mode silicon photodiode with very high gain», *Nucl. Phys. B – Proc. Suppl*., vol. 61, pp. 347–352, 1998. doi: 10.1016/S0920-5632(97)00585-9.

34. A. Akindinov, G. Bondarenko, V. Golovin et al, «Scintillation counter with MRS APD light readou», *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip*. vol. 539, pp. 172–176, 2005. doi: 10.1016/j.nima.2004.10.026.
35. P. Buzhan, B. Dolgoshein, A. Ilyin et al, «An advanced study of silicon photomultiplier», in: ICFA Instrum.Bull., 2001, pp. 28–41. URL: http://inspirehep.net/record/572187?ln=en (accessed December 10, 2014) (дата обращения: 14.12.2024).
36. P. Buzhan, B. Dolgoshein, L. Filatov et al, «Silicon photomultiplier and its possible applications», *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip*. vol. 504, pp. 48–52, 2003. doi: 10.1016/S0168-9002(03)00749-6.
37. V. Andreev, V. Balagura, B. Bobchenko et al, «A high-granularity scintillator calorimeter readout with silicon photomultipliers», *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip*. vol. 540, pp. 368–380, 2005. doi: 10.1016/j.nima.2004.12.002.
38. R. Mirzoyan, P. Buzhan, B. Dolgoshein et al, «SiPM: on the Way at Becoming an Ideal Low Light Level Sensor» in: *Talk given IEEE Nucl. Sci. Symp. Med. Imaging Conf., Knoxville*, USA, Knoxville, USA, 2010.
39. D. McNally, V. Golovin, «Review of solid state photomultiplier developments by CPTA and photonique SA», *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip*., vol. 610, pp. 150–153, 2009. doi: 10.1016/j.nima.2009.05.140.
40. K. Linga, E. Godik, J. Krutov et al, «Novel sensor for ultrasensitive and single-molecule detection», in: J. Enderlein, Z.K. Gryczynski (Eds.), Prog. Biomed. Opt. Imaging – Proc. SPIE, p. 60920X, 2006. doi: 10.1117/12.647150.
41. K. Linga, E. Godik, J. Krutov et al, «Solid state photomultiplier: noise parameters of photodetectors with internal discrete amplification» in: M.J. Cohen, E.L. Dereniak (Eds.), Proc. SPIE, p. 61190K, 2006. doi: 10.1117/12.648755.
42. E. Levin, E. Shelegeda, V.E. Shubin et al, «Advances in the development of solid state photomultipliers for medical imaging» in: J. Hsieh, E. Samei (Eds.), *Med. Imaging 2008 Phys. Med. Imaging, Pts 1-3, SPIE*, p. 69130J, 2008. doi: 10.1117/12.772213.
43. H.N. Becker, W.H. Farr, D.Q. Zhu, «Radiation Response of Emerging High Gain, Low Noise Detectors», I*EEE Trans. Nucl. Sci*., vol. 54, pp. 1129–1135, 2007. doi: 10.1109/TNS.2007.894179.
44. M.A. Itzler, X. Jiang, B. Nyman, K. Slomkowski, «InP-based negative feedback avalanche diodes» in: M. Razeghi, R. Sudharsanan, G.J. Brown (Eds.), *Proc. SPIE*, p. 72221K, 2009. doi: 10.1117/12.814669.
45. Z. Sadygov, A.F. Zerrouk, A. Ariffin et al, «Performance of new Micro-pixel Avalanche Photodiodes from Zecotek Photonics», *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip*. vol. 610, pp. 381–383, 2009. doi: 10.1016/j.nima.2009.05.123.
46. N. Anfimov, I. Chirikov-Zorin, A. Dovlatov et al, «Novel micropixel avalanche photodiodes (MAPD) with super high pixel density», *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.* vol. 628, pp. 369–371, 2011. doi: 10.1016/j.nima.2010.07.003.
47. Y. Musienko, A. Heering, «Studies of large dynamic range silicon photomultipliers for the CMS HCAL upgrade» in: New Dev. Photodetection (NDIP 11), Lyon, Fr. 4–8 July 2011, URL: http://ndip.in2p3.fr/ndip11/AGENDA/AGENDA-by-DAY/Presentations/5Friday/PM/ID83_Musienko.pdf (дата обращения: 14.12.2024).
48. C. Piemonte, «A new Silicon Photomultiplier structure for blue light detection», *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.* vol. 568, pp. 224–232, 2006. doi: 10.1016/j.nima.2006.07.018.
49. K. Yamamoto, K. Yamamura, K. Sato, «Development of Multi-Pixel Photon Counter (MPPC)», in: *2007 IEEE Nucl. Sci. Symp. Conf. Rec.*, IEEE, pp. 1511–1515, 2007. doi: 10.1109/NSSMIC.2007.4437286.
50. A.G. Stewart, V. Saveliev, S.J. Bellis et al, «Performance of 1 mm^2 Silicon Photomultiplier», *IEEE J. Quantum Electron*. vol. 44, pp. 157–164, 2008. doi: 10.1109/JQE.2007.910940.
51. P. Finocchiaro, A. Pappalardo, L. Cosentino et al, «Characterization of a Novel 100-Channel Silicon Photomultiplier — Part I: Noise», *IEEE Trans. Electron Devices*., vol. 55, pp. 2757–2764, 2008. doi: 10.1109/TED.2008.2003996.
52. P. Finocchiaro, A. Pappalardo, L. Cosentino et al, «Characterization of a Novel 100-Channel Silicon Photomultiplier — Part II: Charge and Time», *IEEE Trans. Electron Devices*. vol. 55, pp. 2765–2773, 2008. doi: 10.1109/TED.2008.2003235.
53. E.B. Johnson, C.J. Stapels, M. McClish et al, «New developments for CMOS SSPMs», *2008 IEEE Nucl. Sci. Symp. Conf. Rec.* pp. 1516–1522, 2008. doi: 10.1109/NSSMIC.2008.4774701.

54. C. Dege, G. Prescher, T. Frach et al, «The digital Silicon Photomultiplier; A novel sensor for the detection of scintillation light» in: *IEEE Nucl. Sci. Symp. Conf. Rec.*, **IEEE, 2009: pp. 2383–2386, 2009. doi: 10.1109/NSSMIC.2009.5402190.**

55. P. Berard, M. Couture, P. Deschamps et al, «Performance measurement for a new low dark count UV-SiPM» in: *2011 IEEE Nucl. Sci. Symp. Conf. Rec.*, **IEEE, 2011: pp. 544–547. doi: 10.1109/NSSMIC.2011.6154109.**

56. C. Dietzinger, T.R. Ganka, W. Gebauer et al, «Silicon Photomultipliers with enhanced Blue-Light Sensitivity, Photodet», pp. 1–20, 2012. URL: https://indico.cern.ch/event/164917/session/0/contribution/18/material/slides/0.pdf.

Solid-State Detectors of Optical Signals and Radiation. Part 1. Review of the Detector Designs and Characteristics

Vinogradov Sergey (P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia)

Abstract. **The first part of the review presents the history of the development of solid-state detectors and the features of their designs. The main attention is paid to avalanche photodiodes and silicon photomultipliers, the most sensitive and therefore the most demanded solid-state detectors of low-photon optical signals and radiation.**

Keywords: *photoelectric effect, photodiode, avalanche photodiode, APD, Geiger-mode APD, single-photon APD, silicon photomultiplier, SiPM.*

С.Л.Виноградов (с.н.с., к.ф.-м.н.) – Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва

Контакты: тел. +7 499 132-62-86; vinogradovsl@lebedev.ru

DOI: 10.37414/2075-1338-2024-119-4-28-34 УДК 629.039.58

Оценка биологической защиты энергоблоков ВВЭР-1200

А.Г.Алексеев[1], В.А.Пикалов[1], П.А.Алексеев[2]

[1]«НИЦ Курчатовский институт» (ИФВЭ), г. Протвино
[2]АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск

Рассмотрены результаты проверки эффективности биологической защиты Белорусской АЭС, которая была выполнена ООО «АПИ» при пуске энергоблоков. Полученные данные сравниваются с аналогичными результатами для энергоблоков ВВЭР-1200 Ленинградской АЭС. При этом Ленинградская АЭС принята в качестве референтной для энергоблоков проекта АЭС-2006, строящихся в рамках реализации зарубежных проектов АЭС корпорации «Росатом».

Ключевые слова:
радиационная защита, гамма и нейтронное излучение, мощность амбиентного эквивалента дозы, АЭС-2006.

В период с 2016 по 2023 г. на Нововоронежской, Ленинградской и Белорусской АЭС введено 6 блоков с реакторной установкой ВВЭР-1200. Блоки с ВВЭР-1200 отличаются от блоков ВВЭР-1000 техническими решениями по размещению оборудования, а также комплексом активных и пассивных систем безопасности [1].

Обязательным условием при вводе в эксплуатацию новых блоков АЭС является проведение работ по проверке радиационной защиты реакторной установки и оборудования [2], т. е. подтверждению соответствия возведенной радиационной защиты проектным решениям по толщине бетона и компоновке.

Проверка заключается в сравнении непосредственно измеренной мощности дозы гамма и нейтронного излучения с критерием по мощности дозы, установленным проектировщиком блока. Под критериями здесь понимается

расчетное (проектное) значение мощности дозы в определенном месте в помещении энергоблока при работе реакторной установки (РУ) при номинальной (100%) мощности. Если измеренное значение ниже значения критерия, то делается вывод о соответствии возведенной радиационной защиты проекту.

Измерения проводятся при работающем реакторе внутри гермообъема блока АЭС в определенных точках в помещениях, которые могут быть посещаемы при работе реактора. Среди таких точек можно выделить площадки осмотра и обслуживания главных циркуляционных насосных агрегатов (ГЦНА) рядом с улитками и приводами ГЦНА – площадки возле шахты реактора и бассейна выдержки.

В данной работе приводится описание методики измерений и сравнение мощности доз, полученных в период пуска энергоблоков с ВВЭР-1200.

Критерии и точки измерения

Для помещений постоянного или временного пребывания персонала, а также для строений на территории санитарно-защитной зоны (СЗЗ) и технической площадки АЭС критериями служат требования нормативных документов [2].

Критерии для помещений внутри герметичной защитной оболочки блока АЭС (контейнмента или герметичной оболочки (гермообъема (ГО))) устанавливаются проектантом в окончательном отчете обоснования безопасности (ООООБ) на основании возможности доступа персонала в данные помещения при работе РУ для проведения осмотра и ремонта оборудования; в этом случае выполняется расчет мощности дозы внешнего облучения в конкретном помещении. Расчет проводится с помощью специализированных аттестованных программ. За критерий принимается суммарное значение мощности дозы нейтронного и гамма-излучения, нормированное на 100% мощность реактора.

Поскольку все три АЭС построены по одному и тому же проекту «АЭС-2006», то и критерии для них одинаковые, хотя имеются различия в компоновке радиационной защиты внутри ГО. В табл.1 приведены значения проектных критериев для некоторых помещений [3].

Отметим, что измерения по пп. 1–7 проводятся при минимально контролируемом уровне тепловой мощности реактора, т. к. в данных помещениях значения мощности дозы излучения даже на этом уровне довольно высоки. Измерения 8–14 проводятся несколько раз на различных уровнях тепловой мощности реактора. Например, на Белорусской АЭС измерения проводились на уровнях 1%–20% от $N_{ном}$, 25%–30% от $N_{ном}$, 30%–50% от $N_{ном}$, 50%, 75% и 100% от $N_{ном}$.

Кроме того, до физического пуска реактора проводятся измерения радиационного фона в данных помещениях.

На рис.1 показаны примерные точки измерения мощности дозы нейтронного и гамма-излучений в гермообъеме блока АЭС. Номер точки соответствует номеру в табл.1.

По результатам исследования делаются выводы о качестве исполнения локальной радиационной защиты реактора и оборудования АЭС.

Средства измерения

Для проведения исследований применялось следующее оборудование.

Для измерения АЭД и МАЭД рентгеновского и гамма-излучения в диапазоне энергий от 15 кэВ до 3 МэВ:

- дозиметр рентгеновского и гамма-излучения ДКС-АТ1121 или ДКС-АТ1123 (предел измерения мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) в диапазоне от 50 нЗв/ч до 10 Зв/ч, амбиентного эквивалента дозы (АЭД) в диапазоне от 10 нЗв до 10 Зв,

Табл.1. *Проектные критерии мощности дозы при номинальной мощности реакторной установки (ИК-ионизационные камеры системы контроля нейтронного потока; ГЦТ – главные циркуляционные трубопроводы; ПГ – парогенератор; ГЦНТ – главный циркуляционный насосный агрегат; ВБ – верхний блок реактора; БЭР – блок электроразверток).*

№	Помещение/точка измерения	Значение критерия мЗв/ч
1	На поверхности биозащиты вблизи выводов каналов ИК	$3{,}9\cdot10^{3}$
2	В шахтном объеме в зоне патрубков ГЦТ под «холодным патрубком» ГЦТ в непосредственной близи от патрубка	$1{,}0\cdot10^{3}$
3	В шахтном объеме в зоне патрубков ГЦТ центру зазора между «холодным» и «горячим» патрубком ГЦТ	$8{,}6\cdot10^{2}$
4	В шахтном объеме в зоне патрубков ГЦТ над «горячим» патрубком ГЦТ в непосредственной близи от патрубка	$1{,}2\cdot10^{3}$
5	В боксе ПГ над средней площадкой обслуживания с торца ПГ	$3{,}7\cdot10^{1}$
6	В боксе ПГ в районе «горячего» коллектора ПГ	$4{,}3\cdot10^{2}$
7	В боксе ПГ в районе улитки ГЦНА	$2{,}1\cdot10^{2}$
8	В верхней части шахтного объема на поверхности средней площадки обслуживания БЭР	$6{,}1\cdot10^{-1}$
9	В верхней части шахтного объема на поверхности верхней площадки обслуживания БЭР	$6{,}6\cdot10^{-2}$
10	В верхней части шахтного объема в реакторном зале у края бетонной шахты реактора	$3{,}4\cdot10^{-2}$
11	В верхней части шахтного объема на поверхности нижней площадки обслуживания БЭР	2,9
12	На площадках обслуживания в районе привода ГЦНА	$1{,}6\cdot10^{-1}$
13	В верхней части шахтного объема на поверхности воздушного коллектора ВБ	1,5
14	В верхней части шахтного объема на поверхности бетонной консоли в районе сильфона	5,1

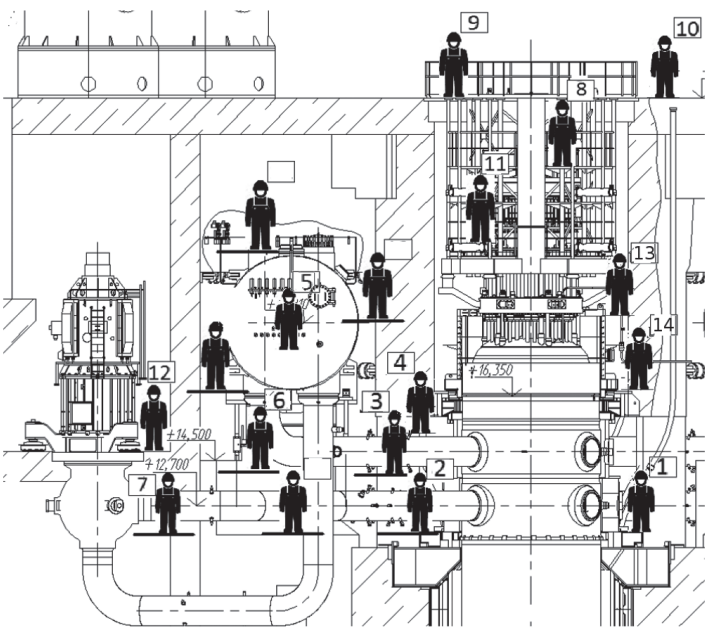


Рис.1. *Примерное положение точек измерения.*

пределы допускаемой основной относительной погрешности измерения дозы и мощности дозы ±15%).

Для измерения АЭД и МАЭД нейтронного излучения в диапазоне энергий от 0,025 эВ до 10 МэВ:

- дозиметр-радиометр нейтронов ДКС-96Н с блоком детектирования БДМН-96 (предел измерения МАЭД в диапазоне от 0,1 мкЗв/ч до 0,1 Зв/ч, АЭД в диапазоне от 0,1 мкЗв до 1,0 Зв, пределы допускаемой основной относительной погрешности измерения АЭД и МАЭД $\pm(25+6/A_x)$, где A_x – безразмерная величина, численно равная измеренному значению МАЭД в мкЗв/ч или АЭД в мкЗв) [5].

Стоит отметить, что у ДКС-96Н есть возможность сохранения в памяти измеренных значений с фиксацией момента времени измерения. ДКС-АТ1123 имеет возможность выведения на экран максимального значения мощности дозы, измеренной за определенный период времени. Данные возможности позволили провести измерения в точках 13 и 14, когда проход к ним был затруднен. Приборы опускались с площадки обслуживания точки 9 и 10 на тросе, и затем фиксировались результаты измерения.

Проведение измерений

Перед проведением измерений разрабатывается программа испытаний оборудования, в которой четко прописываются обязанности, ответственность персонала АЭС и персонала организации, непосредственно выполняющей измерения. Указываются: степень готовности испытуемых и смежных систем; необходимое для проведения испытания оборудование; приемочные критерии.

До физического пуска реактора проверяется: доступность оборудования; наличие предусмотренных проектом площадок обслуживания, лестниц, настилов, ограждений; отсутствие грязи, мусора, посторонних предметов на площадках обслуживания и в оборудовании, а также достаточность освещения.

Должны быть работоспособны: автоматизированная система радиационного контроля обстановки в помещениях и на промплощадке; автоматизированная система радиационного контроля за нераспространением радиоактивных загрязнений; автоматизированная система индивидуального дозиметрического контроля. Должна быть работоспособна аппаратура контроля нейтронного потока.

Перед началом работ должен быть проведен инструктаж персонала, участвующего в проведении работ.

Весь персонал, участвующий в испытаниях, должен быть обеспечен СИЗ, подлежит обязательной постановке на дозиметрический учет с оформлением допуска к выполнению работ в условиях профессионального облучения.

Испытания проводятся под контролем персонала АЭС. Отдел радиационной безопасности (ОРБ) согласует дозовый наряд и следит за непревышением доз, полученных при выполнении испытаний. Реакторный цех отвечает за соблюдение условий безопасного



Рис.2. *Внешний вид ДКС-АТ1123 [4].*





Рис.3. *Внешний вид ДКС-96Н с блоком детектирования БДМН-96 5 дюймов и стандартный блок детектирования БДМН-96 [6].*

выполнения подготовки и проведения работ, за состояние испытываемого и смежного оборудования.

Непосредственное измерение мощности дозы происходит следующим образом: персонал, выполняющий измерения, в сопровождении представителей реакторного цеха и ОРБ (измеряющего мощность дозы по маршруту движения) выдвигаются в нужное помещение. Осуществляется вход в ЗКД, далее – шлюз для персонала, подходят к точкам измерения в гермообьеме блока АЭС.

Производится измерение мощности дозы гамма и нейтронного излучения в точках, описанных в программе испытаний. Значения мощности доз фиксируются с указанием времени и точки измерения.

После выполнения измерений персонал выводится из гермообъема и ЗКД. Производится анализ и обработка результатов измерений.

При проведении измерений на промежуточных уровнях мощности реактора (от МКУ до 100% от номинальной) проводится перерасчет результатов измерений на 100% уровень мощности реактора в линейной пропорции. Например, результаты измерений, выполненные на 40% $N_{ном}$, умножаются на коэффициент 2,5. Для пересчета используются результаты данных контроля потока нейтронов с учетом изменения мощности реактора во время проведения испытаний, если изменения превышали более 5%. Результат измерения фона (выполненный до физического пуска реактора) вычитается из результатов измерения на мощности.

Превышение результатов замеров над проектными данными по одному или нескольким пунктам на отдельных этапах освоения мощности реактора указывает либо на отступление от проекта при изготовлении и монтаже элементов биологической защиты реакторной установки, либо на недостаточную консервативность проектных данных по уровню излучения в данных точках.

Выполнение измерений на разных уровнях мощности РУ в одних и тех же точках позволяет уменьшить погрешность результатов за счет субъективного фактора.

Результаты измерений

В табл.2 представлены значения суммарной мощности дозы, измеренной в точках на рассматриваемых АЭС, мЗв/ч, приведенной к величине номинальной мощности (100%) РУ.

При проведении проектных расчетов радиационной защиты используется упрощенная

Табл.2. *Результаты проведенных измерений. Суммарная мощность амбиентного эквивалента дозы (мЗв/ч) при номинальной мощности (100%) реакторной установки. Описание точки измерения дано в табл.1.*

№ точки измерения	Критерий	ЛАЭС-2 ЭБ № 2	БАЭС ЭБ № 2
1	$3{,}9\cdot10^{3}$	$1{,}13\cdot10^{3}$	$3{,}65\cdot10^{3}$
2	$1{,}0\cdot10^{3}$	$3{,}71\cdot10^{2}$	$9{,}45\cdot10^{2}$
3	$8{,}6\cdot10^{2}$	$7{,}29\cdot10^{2}$	$8{,}45\cdot10^{2}$
4	$1{,}2\cdot10^{3}$	$9{,}29\cdot10^{2}$	$1{,}09\cdot10^{3}$
5	$3{,}7\cdot10^{1}$	23,6	7,3
6	$4{,}3\cdot10^{2}$	-	$4{,}00\cdot10^{2}$
7	$2{,}1\cdot10^{2}$	$1{,}66\cdot10^{2}$	$1{,}95\cdot10^{2}$
8	$6{,}1\cdot10^{-1}$	$4{,}8\ 10^{-2}$	$3{,}154\cdot10^{-2}$
9	$6{,}6\cdot10^{-2}$	$1{,}21\cdot10^{-2}$	$6{,}86\cdot10^{-3}$
10	$3{,}4\cdot10^{-2}$	$2{,}15\cdot10^{-3}$	$1{,}106\cdot10^{-3}$
11	2,9	0,225	0,314
12	$1{,}6\cdot10^{-1}$	$2{,}7\cdot10^{-2}$	$3{,}77\cdot10^{-2}$
13	1,5	0,582	0,72
14	5,1	0,594	1,45

модель геометрии защиты, так как невозможно предусмотреть все возможные решения при реальной компоновке оборудования и изготовлении защиты при строительстве. Поэтому обычно в практике проектов радиационной защиты закладывают фактор 2 (результат расчета умножается на 2). Одним из причин различия результатов измерений мощности амбиентного эквивалента дозы на разных энергоблоках является конкретная реализация строительных решений на каждом отдельном объекте. Надо отметить, что во всех случаях результаты проверки эффективности биологической защиты удовлетворяют критериям успешности испытаний. При этом запас консервативности (отличие от проектных данных) для разных точек разный – от порядка 1000% до 10%.

Заключение

Рассмотренная методика измерений позволяет достаточно объективно судить об эффективности биологической защиты вновь строящегося энергоблока АЭС (в данном случае проекта АЭС-2006).

Сравнение результатов проверки эффективности биологической защиты для блоков ВВЭР-1200 Ленинградской АЭС и Белорусской АЭС подтверждает факт, что энергоблоки 5 и 6 ЛАЭС служат референтными для данного проекта и для международных проектов Госкорпорации «Росатом»: АЭС «Пакш-2», АЭС «Эль-Дабаа», АЭС «Ханхикиви-1» и т. д. [7,8].

Данная работа выполнена в рамках договора ООО «АПИ» – АО «АтомТехЭнерго», под руководством Генерального директора ООО «АПИ» А.Ю. Соколова. Большой вклад в проведении измерений сделали сотрудники ООО «АПИ» Н.Н. Бараненков, Г.Н. Котькин, Е.С. Харлампиев.

Литература

1. **Проект АЭС-2006 «Атомэнергопроект», С.-Петербург, 2013, 50 л. URL: https://atomenergoprom.ru/u/file/npp_2006_rus.pdf (дата обращения 16.06.2024).**
2. **Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций. СанПин 2.6.1.24-03.**
3. **АЭС-2006. Нововоронежская АЭС-2. Установка реакторная В-392М. Расчет радиационной защиты. Часть 1. Уровни излучений при номинальном режиме. 2006. В.132.&.0UJA&&.&&&&&.021. RZ.0003.392M РРЗ. ОКБ «Гидропресс», 2008.**
4. **Дозиметры рентгеновского и гамма-излучения ДКС-АТ1121, ДКС-АТ1123. URL: https://atomtex.com/ru/dozimetry-rentgenovskogo-i-gamma-izlucheniya-dks-at1121-dks-at1123 (дата обращения: 16.06.2024).**
5. **Руководство по эксплуатации ТЕ1.415313.003РЭ.**
6. **Алексеев А.Г., Пикалов В.А., Алексеев П.А. Поправочные коэффициенты при измерении мощности амбиентного эквивалента дозы нейтронов//АНРИ. 2021. № 4(107). С. 32-40.**
7. **Информационный бюллетень Госкорпорации «Росатом». URL: https://rosatomnewsletter.com/ru/2022/10/30/clear-reference/?ysclid =lxan2ekdtv294710013 (дата обращения: 16.06.2024).**
8. **Курские атомщики прошли на Ленинградской АЭС производственную стажировку по вводу в эксплуатацию референтных блоков. URL: https://www.rosenergoatom.ru/stations_projects/sayt-leningradskoy-aes/press-tsentr/novosti/44157/ (дата обращения: 16.06.2024).**

Radiation Shielding Verification of VVER-1200 Power Units

Alexeev Alexander, Pikalov Vladimir (NRC «Kurchatov Institute» – IHEP, Protvino, Russia)
Alexeev Pavel (JSC «SSC RF – IPPE», Obninsk, Russia)

Absract. **The results of the verification of the effectiveness of biological protection of the Belarusian NPP, which was performed during the start-up of power units, are considered. They are compared with similar results for the VVER-1200 power units of the Novovoronezh and Leningrad NPP. The comparison with the Leninigrad NPP with VVER-1200 was made from the point of view that it was accepted as a reference for the power units of the NPP-2006 project for foreign NPP projects of the Rosatom Corporation.**

Keywords: *radiation shield, gamma and neutron radiation, ambient dose equivalent power, NPP-2006.*

А.Г.Алексеев[1] (с.н.с.), В.А.Пикалов[1] (нач. лаб.), П.А.Алексеев[2] (к.т.н., в.н.с.)
[1]«НИЦ Курчатовский институт» (ИФВЭ), г. Протвино
[2]АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск
Контакты: тел. +7 (4967) 71-38-27, Alexeev@ihep.ru

DOI: 10.37414/2075-1338-2024-119-4-35-42 УДК 539.1.08:539.16.08

Оценка неопределенности при измерениях дозиметрических характеристик фотонных полей линейных ускорителей электронов

С.В.Лазаренко, А.Ю.Тараев, А.А.Загороднюк

Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ», г. Минск, Республика Беларусь

В статье рассмотрены основные компоненты бюджета неопределенности при измерении средней мощности амбиентного эквивалента дозы $\dot{H}^*(10)$ (далее – СМАЭД), генерируемого медицинским линейным ускорителем электронов (далее – ЛУЭ). Бюджет неопределенности СМАЭД составлен для случая проверки работоспособности дозиметрического оборудования в полях импульсного микросекундного фотонного излучения, генерируемых ЛУЭ согласно методике, описанной в работах [1,2,3,4]. Оценка неопределенности СМАЭД, генерируемой ЛУЭ в точке измерения, производилась по процедуре, описанной в ГОСТ 34100.3.2-2017 [5]. Согласно данной схеме, на первом этапе происходило определение базовой дозиметрической величины – мощности кермы в воздухе (далее – мощность кермы), генерируемой ЛУЭ в заданной точке, путем измерений эталонным дозиметром ДКСАТ5350/1 в составе с ионизационной камерой ТМ32002 (далее – ИК). На втором этапе был произведен перерасчет мощности кермы в СМАЭД с помощью переходного коэффициента (который в общем случае зависит от энергии излучения) согласно СТБ ИСО 4037-3-2022 [6]. Оценка неопределенности после каждого этапа происходила исходя из явного вида выражения, связывающего входные и выходные параметры (ток – мощность кермы для первого этапа, мощность кермы – СМАЭД для второго этапа). Установлено, что неопределенность измерения СМАЭД, генерируемой ЛУЭ в точке измерения, рассчитанная согласно выше описанной схеме, не превышает 13% для всех режимов работы ЛУЭ.

Ключевые слова:
линейный ускоритель электронов, импульсное фотонное излучение, калибровка дозиметра, неопределенность измерений.

В 2019 году вышел обновленный стандарт МЭК IEC/TS 63050:2019 «Radiation protection instrumentation – Dosimeters for pulsed fields of ionizing radiation» [7], регламентирующий требования к дозиметрическому оборудованию, предназначенному для работы в полях импульсного фотонного излучения. Дополнительно в 2019 году был пересмотрен и продлен стандарт ISO/TS 18090-1:2019 «Radiological protection – Characteristics of reference pulsed radiation. Part 1: Photon radiation» [8], регламентирующий требования к параметрам референсного (эталонного) импульсного фотонного излучения, пригодного для калибровки дозиметрического оборудования.

В выше упомянутых стандартах регламентируются такие характеристики полей импульсного фотонного излучения, как мощность кермы, СМАЭД, мощность амбиентного эквивалента дозы в единичном импульсе, частота следования импульсов, длительность единичного импульса, которые необходимо определить перед тем как проводить калибровку дозиметрического оборудования в данных полях. Однако стандарты не регламентируют тип источников импульсного фотонного излучения, которыми должны создаваться такие поля.

В цикле статей [1,2,3] в качестве источника поля импульсного фотонного излучения, способного создавать поля, пригодные для калибровки дозиметрического оборудования, было предложено использовать медицинский линейный ускоритель электронов. Для этого был разработан алгоритм оценки основных энергетических и частотных характеристик поля, создаваемых ЛУЭ в точке измерения, а именно: средней энергии излучения, длительности импульса, частоты следования импульсов. Дополнительно был предложен метод перерасчета базовой дозиметрической величины (мощности кермы), генерируемой ЛУЭ в точке измерения, в СМАЭД. Под базовой дозиметрической величиной в настоящей работе понимается дозиметрическая величина, на основе которой рассчитываются все последующие производные от нее дозиметрические величины. На основе данного метода в статьях [1,2,3] была выполнена оценка СМАЭД и мощности амбиентного эквивалента дозы в единичном импульсе (далее – МАЭД в импульсе), генерируемых ЛУЭ в точке измерения при заданном режиме работы. Практическое применение алгоритма было проверено в работе [4] путем прямых измерений с использованием дозиметрического оборудования методом сличения показаний дозиметра с опорными величинами.

Под опорной величиной в данных статьях понималось значение СМАЭД, генерируемой ЛУЭ в заданной точке, рассчитанное на основе базовой дозиметрической величины – мощности кермы, измеренной при помощи эталонного дозиметра ДКСАТ5350/1 в составе с ИК ТМ32002. Следует отметить, что ИК эталонного дозиметра не измеряет мощность кермы напрямую. Выходной величиной, прямо измеряемой ИК дозиметра, является электрический ток, значение которого пересчитывают в мощность кермы согласно методике [9] при помощи коэффициентов пересчета. Однако ввиду того, что ИК дозиметра предварительно калибруется в поле эталонного излучения (под калибровкой понимается определение калибровочных коэффициентов, позволяющих пересчитать ток в мощность кермы), можно сказать, что выходной величиной, измеряемой дозиметром при заданных условиях, является мощность кермы, измеренная с заданной неопределенностью. При таком подходе, происходит передача единицы эталона базовой дозиметрической величины от средства измерения (эталонного дозиметра, откалиброванного в эталонном поле) полю, создаваемому ЛУЭ в точке измерения при заданном режиме работы. В публикации [4] было экспериментально показано, что ЛУЭ может быть использован в качестве источника поля для проверки работоспособности дозиметрического оборудования.

Однако для того, чтобы ЛУЭ в совокупности с заданной методикой расчета опорной дозиметрической величины мог быть использован для проверки работоспособности и калибровки дозиметрического оборудования, необходимо дополнительно иметь алгоритм расчета расширенной неопределенности измерения опорной дозиметрической величины (в данном случае СМАЭД), генерируемой таким источником. Под неопределенностью измерений в настоящей работе понимается параметр, относящийся к результату измерения и характеризующий разброс значений, которые могли бы быть обоснованно приписаны измеряемой величине. Неопределенность измерений чаще всего применяется в виде расширенной неопределенности измерений $\pm U$, которая

является произведением коэффициента охвата k и суммарной стандартной неопределенности измерений u_C. Суммарная стандартная неопределенность u_C – суммарный вклад оценки (неопределенностей) типа А и В (u_A, u_B).

Целью настоящей работы является оценка неопределенности измерений при расчете значения опорной величины СМАЭД на основе пересчета базовой дозиметрической величины (мощности кермы), генерируемой ЛУЭ в точке измерения. Дополнительно исследовались воспроизводимость и повторяемость значений СМАЭД, генерируемых ЛУЭ.

Алгоритм расчета СМАЭД, генерируемой ЛУЭ в точке измерения

В общем случае построение алгоритма расчета СМАЭД, генерируемой ЛУЭ в точке измерения в заданном режиме работы, можно разбить на несколько этапов. На первом этапе происходит подготовка ЛУЭ к измерениям:

- излучатель ускорителя поворачивается на 90 градусов относительно вертикали;
- на излучатель устанавливается свинцовый фильтр заданной толщины, необходимый для ослабления интенсивности излучения до значений, попадающих в диапазон измерения дозиметрического оборудования. Расчет толщины свинцового фильтра и его влияние на среднюю энергию и спектр фотонного излучения детально описаны в публикациях [1,2,3];
- ионизационная камера ТМ32002, на которую предварительно надет акриловый колпачок, обеспечивающий электронное равновесие при заданных условиях облучения [1], устанавливается в точку измерения (рис.1); точка измерения выбирается таким образом, чтобы минимизировать вклад рассеянного излучения как от свинцового фильтра, так и от стен помещения;
- в точке размещения ИК измеряется температура окружающего воздуха, влажность и атмосферное давление. Данные значения необходимы для расчета поправки на плотность воздуха при измерении мощности кермы ионизационной камерой.

Далее после предварительных приготовлений задается режим работы ЛУЭ. Под режимом работы ускорителя в настоящей статье понимается значение ускорительного напряжения первичного электронного пучка, падающего на мишень ЛУЭ [3].

На втором этапе происходит определение мощности кермы в воздухе, которая является базовой дозиметрической величиной [10]. Для каждого заданного режима работы ЛУЭ производилось 5 последовательных измерений мощности кермы.

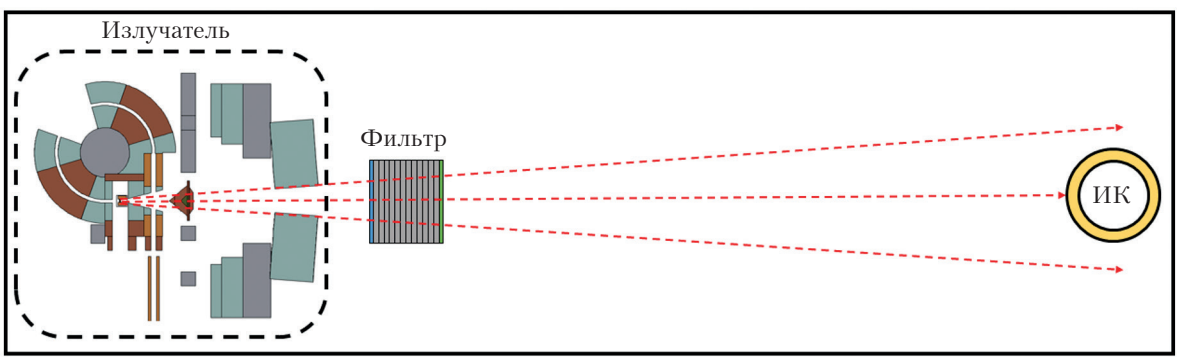


Рис.1. *Схематическое изображение расположения ИК с акриловым колпачком относительно излучателя ЛУЭ.*

Общую форму расчета мощности кермы можно представить в виде:

$$\dot{K} = \frac{3600 \cdot \overline{M}_K \cdot \hat{C}_K \cdot \hat{C}_{tp} \cdot \hat{C}_{pol} \cdot \hat{C}_{rec} \cdot \hat{C}_T \cdot \hat{C}_v}{\tau}, \quad (1)$$

где *3600* – пересчет кермы за время измерений τ в мощность кермы, выраженную в Гр/ч; $\overline{M}_K$ – среднее арифметическое показаний кермы эталонного дозиметра ДКС-АТ5350/1; $\hat{C}_K$ – поправочный множитель на ионизационную камеру (берется из свидетельства на калибровку (поверку) ионизационной камеры (дозиметра ДКСАТ5350/1)); $\hat{C}_{tp}$ – поправочный множитель на плотность воздуха, который зависит от температуры воздуха *t* и атмосферного давления *p,* рассчитывают по формуле:

$$\hat{C}_{tp} = \frac{(273 + t) \cdot 101{,}32}{293 \cdot p}, \quad (2)$$

$\hat{C}_{pol}$ – поправочный множитель на эффект полярности, который рассчитывался согласно [9]; $\hat{C}_{rec}$ – поправочный множитель на рекомбинацию ионов, который рассчитывался согласно [9]; $\hat{C}_T$ – поправочный множитель на погрешность длительности импульса рентгеновского излучения, при расчетах принимался равным *1*; $\hat{C}_v$ – поправочный множитель на погрешность частоты рентгеновского излучения, при расчетах принимался равным *1.*

На третьем этапе происходит расчет опорной дозиметрической величины СМАЭД на основе ранее определенного значения мощности кермы согласно формуле (3):

$$\dot{H}^*(10) = \hat{C}_h \cdot \dot{K}, \quad (3)$$

где $\hat{C}_h$ – коэффициент перехода от мощности кермы к МАЭД.

Алгоритм оценки неопределенности расчета СМАЭД

Исходя из формулы (1), расчет суммарной основной относительной неопределенности измерения мощности кермы можно представить следующим выражением:

$$\hat{u}_c\left(\dot{K}\right) = \sqrt{\hat{u}_A^2\left(M_K\right) + \hat{u}_B^2\left(\hat{C}_K\right) + \hat{u}'^2_B\left(\hat{C}_K\right) + \hat{u}_B^2(t) + \hat{u}_B^2(p) + \hat{u}_B^2(T) + \hat{u}_B^2(v)}. \quad (4)$$

Слагаемые, входящие в формулу (4), являются оценками неопределенности соответствующих величин, входящих в формулу (1). Явный вид формул, необходимых для расчета данных слагаемых, приведен в табл.1.

Подставляя численные значения, приведенные в табл.1, в формулу (4), получаем значение величины суммарной относительной неопределенности измерения мощности кермы, равное $\hat{u}_c\left(\dot{K}\right) = 5{,}3\%$.

Суммарную основную относительную неопределенность измерений СМАЭД, исходя из формулы (3), можно представить следующим выражением:

$$\hat{u}_c\left(\dot{H}^*(10)\right) = \sqrt{\hat{u}_c^2\left(\dot{K}\right) + \hat{u}_B^2\left(\hat{C}_h\right) + \hat{u}_B^2(E)}, \quad (5)$$

где $\hat{u}_B\left(\hat{C}_h\right)$ – оценка неопределенности значения коэффициента перехода мощности кермы к МАЭД (согласно [6], численное значение коэффициента равно 2% (*k = 1*)); $\hat{u}_B(E)$ – оценка неопределенности коэффициента перехода мощности кермы к МАЭД, обусловленная погрешностью расчета средней энергии фотонного излучения.

Табл.1. *Явный вид выражений для определения неопределенностей, входящих в формулу (4).*

Величина	Тип ОСН	Формула расчета	Коэффициент чувствительности	Численное значение, %
M_K	А	$\hat{U}_A(M_K)=\frac{100}{\bar{M}_Q}\cdot\sqrt{\frac{n-1}{n-3}}\cdot\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(M_{K,i}-\bar{M}_K)^2}{n(n-1)}}$	1	1,1
Примечание. Формула ОСН типа А показаний кермы взята из [11]. Приведено максимальное значение ОСН типа А показаний кермы из всех серий измерений на всех режимах всех типов ускорителей				
$\hat{C}_K$	В	$\hat{U}_B(\hat{C}_K)=\frac{\hat{U}^*(\hat{C}_K)}{k}$	1	4,5
Примечание. $\hat{U}^*(\hat{C}_K)$ – неопределенность измерений кермы ионизационной камерой (9%) и коэффициент расширения k = 2 взяты из свидетельства о калибровке на ионизационную камеру откалиброванной в высокоэнергетических полях в Германском метрологическом институте (PTB).				
$\hat{C}_I$	В	$\hat{U}_B(\hat{C}_I)=\frac{\hat{U}^*(\hat{C}_I)}{k}$	1	0,5
Примечание. $\hat{U}^*(\hat{C}_I)$ – неопределенность измерений тока (заряда) дозиметра (1%) и коэффициент расширения k = 2 взяты из свидетельства о калибровке на дозиметр ДКС-АТ5350/1.				
$\hat{C}_K$	В	$\hat{U}'_B(\hat{C}_K)=\left\lvert\frac{1-\hat{C}_K}{\sqrt{3}}\right\rvert\cdot 100$	1	2,3
Примечание. $\hat{U}'_B(\hat{C}_K)$ – вклад поправочного множителя в неопределенность измерений кермы. $\hat{C}_K$ = 1,039, взято максимальное значение в диапазоне энергий от 662 кэВ до 6,7 МэВ. Делитель $\sqrt{3}$ здесь и далее принят согласно [12], т. к. неизвестен закон распределения.				
t	В	$\hat{U}_B(t)=\frac{\hat{U}^*(t)}{k}$	$\frac{t}{273+t}=0,08$	0,0
Примечание. $\hat{U}^*(t)$ – вклад погрешности температуры в неопределенность измерений кермы (0,2%) и коэффициент расширения k = 2 взяты из свидетельства о калибровке на теромогигрометр. При расчете принят максимальный коэффициент чувствительности при проведении серии измерений на ускорителях.				
p	В	$\hat{U}_B(p)=\frac{\hat{U}^*(p)}{k}$	−1	0,5
Примечание. $\hat{U}^*(p)$ – вклад погрешности атмосферного давления в неопределенность измерений кермы (0,5%) и коэффициент расширения k = 2 взяты из свидетельства о калибровке на теромогигрометр. Взята максимальная неопределенность измерений атмосферного давления за все серии измерений на ускорителях.				
T	В	$\hat{U}_B(T)=\frac{\hat{U}^*(T)}{\sqrt{3}}$	1	0,0
Примечание. $\hat{U}^*(T)$ – вклад погрешности длительности импульса (0%) в неопределенность измерений кермы, взят из [3]. Пренебрежимо мала, т. к. погрешность длительности импульса 0,2 мкс намного меньше времени измерения 60 с.				
v	В	$\hat{U}_B(v)=\frac{\hat{U}^*(v)}{\sqrt{3}}$	1	1,0
Примечание. $\hat{U}^*(v)$ – вклад погрешности частоты импульсов (1,7% – наибольшее значение) в неопределенность измерений кермы взят из [3]				

Неопределенность значения коэффициента перехода от мощности кермы к СМАЭД, обусловленная погрешностью расчета средней энергии фотонного излучения, связана с тем фактом, что, согласно стандарту [6], коэффициент $\widehat{C}_h$ зависит от значения энергии фотонного излучения и в табличном виде определен для ряда энергий. При этом подразумевается, что выбор коэффициента для энергий, попадающих в интервал между табличных значений, производится путем линейной интерполяции. При выборе коэффициента $\widehat{C}_h$ для случая непрерывного спектра фотонного излучения стандарт [6] подразумевает использование среднего арифметического взвешенного значения энергии.

Прямое измерение истинного фотонного спектра излучения ЛУЭ с последующим расчетом его средней энергии является крайне сложным и трудоемким процессом, требующим наличия специализированного оборудования. Поэтому в настоящей работе спектр фотонного излучения ЛУЭ и расчет его средней энергии производился при помощи Монте-Карло моделирования. Детальное описание Монте-Карло моделирования спектра излучения ЛУЭ с рассчитанными значениями средней энергии приведены в работе [3]. Исходя из выше сказанного, можно сделать вывод, что получение формулы для оценки неопределенности $\hat{u}_B(E)$ для коэффициента $\widehat{C}_h$ в явном виде крайне затруднительно.

Однако анализируя приведенные в работе [3] значения средней энергии фотонного излучения ЛУЭ при заданных условиях работы (подходящих для калибровки дозиметрического оборудования), можно заметить, что все они расположены в энергетическом интервале 2÷6 МэВ (с учетом погрешности моделирования). В данном энергетическом интервале зависимость коэффициента $\widehat{C}_h$ от энергии представляет собой монотонно убывающую функцию, значения которой лежат в интервале 1,13÷1,09 Зв/Гр. Как следствие, оценку верхней границы неопределенности $\hat{u}_B(E)$ можно произвести, исходя из граничных значений коэффициента. Для случая, описываемого в настоящей работе, принимая равномерный закон распределения данного типа неопределенности, получаем значение $\hat{u}_B(E) = 4/\sqrt{3} = 2{,}3\%$.

Исходя из выше представленных величин, значение суммарной основной относительной неопределенности измерений СМАЭД $\hat{u}_c\left(\dot{H}^*(10)\right) = 6{,}1\%$.

Расширенную относительную неопределенность измерения СМАЭД с коэффициентом охвата $k = 2$ ($P = 0{,}95$) можно рассчитать согласно следующей формуле:

$$U\left(\dot{H}^*(10)\right) = 2 \cdot \hat{u}_c\left(\dot{H}^*(10)\right). \quad (6)$$

Согласно формуле (6), значение расширенной относительной неопределенности измерения СМАЭД, создаваемой ЛУЭ в заданной точке, равно 12,2%. Эта величина меньше, чем типичное значение основной относительной погрешности стандартного дозиметрического оборудования. Например, дозиметр рентгеновского и гамма-излучения ДКС-АТ1123 и экспериментальный блок БДКГ-206 имеют пределы допустимой основной относительной погрешности ±15%. В связи с этим можно утверждать, что ЛУЭ возможно использовать для проверки работоспособности и калибровки дозиметра рентгеновского и гамма-излучения ДКС-АТ1123 и блока детектирования БДКГ-206 в высокоэнергетических полях импульсного микросекундного фотонного излучения.

Заключение

В работе представлен алгоритм, позволяющий использовать линейный ускоритель электронов для проверки работоспособности и калибровки дозиметрического оборудования в полях импульсного фотонного излучения.

Приведен алгоритм расчета расширенной неопределенности измерений мощности амбиентного эквивалента дозы $U\left(\dot{H}^*(10)\right)$, генерируемой ЛУЭ в точке измерения. В явном виде приведены формулы, необходимые для оценки неопределенности величин, входящих в формулу пересчета тока, измеряемого ИК эталонного дозиметра в мощность кермы, и в формулу пересчета мощности кермы в СМАЭД.

Согласно полученным результатам, максимальная расширенная неопределенность измерений СМАЭД $U\left(\dot{H}^*(10)\right)$ при использовании ЛУЭ в качестве источника полей импульсного микросекундного фотонного излучения для проверки работоспособности и калибровки дозиметрического оборудования не превышает 13% с коэффициентом охвата 2 ($P = 0{,}95$) и при использовании ионизационной камеры ТМ32002, калиброванной с неопределенностью измерений мощности кермы в воздухе не более 9%.

Авторы публикации выражают глубокую благодарность директору предприятия «АТОМТЕХ», к.т.н. В.А.Кожемякину за полезные замечания и рекомендации при ее подготовке.

Литература

1. **Загороднюк А.А., Тараев А.Ю., Лазаренко С.В., Комар Д.И. Влияние свинцового фильтра на среднюю энергию фотонного излучения медицинского линейного ускорителя электронов//АНРИ. 2023. № 2(113). С. 13-24.**
2. **Загороднюк А.А., Тараев А.Ю., Лазаренко С.В. О возможности использования медицинских линейных ускорителей электронов в качестве поля эталонного импульсного фотонного излучения//Приборы и методы измерений. 2023. Т. 14, № 3. С. 179-190.**
3. **Тараев А.Ю., Загороднюк А.А., Богдан М.А., Лазаренко С.В. Оценка характеристик полей фотонного излучения медицинских линейных ускорителей электронов различных производителей// АНРИ. 2023. № 4(115). С. 19-31.**
4. **Тараев А.Ю., Загороднюк А.А., Лазаренко С.В., Масюкович М.В. Оценка функционирования дозиметрического оборудования при проведении измерений в полях импульсного микросекундного фотонного излучения с известными характеристиками//АНРИ. 2024. № 2(117). С. 17-26.**
5. **ГОСТ 34100.3.2-2017. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. Дополнение 2. Обобщение на случай произвольного числа выходных величин. Введ. 2018-09-01. М., 2018. 72 с.**
6. **СТБ ИСО 4037-3-2022. Защита радиологическая. Эталонные рентгеновские и гамма-излучения для калибровки дозиметров и измерителей мощности дозы и определения их отклика как функции энергии фотона. Часть 3. Калибровка дозиметров окружающей среды и индивидуальных дозиметров и измерение их отклика в зависимости от энергии и угла падения излучения. Введ. 22-11-01. Мн., 2022. 58 с.**
7. **IEC/TS 63050:2019. Radiation protection instrumentation – Dosimeters for pulsed fields of ionizing radiation.**

8. ISO/TS 18090-1:2019. Radiological protection – Characteristics of reference pulsed radiation. Part 1: Photon radiation.
9. Technical Report Series no. 398. Absorbed Dose. Determination in External Beam Radiotherapy. IAEA. Vienna. 2000.
10. Кутьков В.А. Величины в радиационной защите и безопасности//АНРИ. 2007. № 3(80). С. 2-25.
11. РМГ 115-2019. Калибровка средств измерений. Алгоритмы обработки результатов измерений и оценивания неопределенностей. Введ. 2020-09-01. М., 2019. 32 с.
12. Ефремова Н.Ю. Оценка неопределенности в измерениях. Практическое пособие. Мн.: БелГИМ, 2003. 50 с.

Estimation of Uncertainty in Measurements of Dosimetric Characteristics of Photon Fields Generated by Linear Electron Accelerators

Lazarenko Sergey, Taraev Aleksandr, Zaharadniuk Aleksei (ATOMTEX SPE, Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. **The article considers the main components of the uncertainty budget when measuring the average ambient dose equivalent rate H*(10) (or ADE for short) generated by a medical linear electron accelerator (or LINAC for short). The budget of the ADE uncertainty is made for the case of assessment of the performance of dosimetric equipment in the fields of pulsed microsecond photon radiation generated by LINAC according to the method described in [1,2,3,4].**

The estimation of the ADE uncertainty generated by LINAC at the measurement point was performed according to the procedure described in GOST 34100.3.2-2017 [5]. According to this scheme, at the first stage the determination of the basic dosimetric quantity – kerma rate in air (or kerma rate for short), generated by LINAC at a given point, was performed by using the reference dosimeter DKS AT5350/1 in combination with the ionization chamber TM32002. At the second stage, the kerma rate was converted to the ADE using the conversion coefficient according to STB ISO 4037-3-2022 [6].

The uncertainty estimation after each stage was based on the explicit form of the expression linking the input and output parameters (current – kerma rate for the first stage, kerma rate – ADE for the second stage). It was found that the uncertainty of the ADE generated by the LINAC at the measurement point, calculated according to the above described scheme, does not exceed 13% for all operating modes of the LINAC.

Keywords: *LINAC, pulsed photon radiation, dosimeter calibration, uncertainty.*

С.В.Лазаренко (вед. инж), А.Ю.Тараев (вед. инж.), А.А.Загороднюк (вед. инж.)
Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ», г. Минск, Республика Беларусь
Контакты: тел. +375 29-557-45-27; +375 29-171-13-72;
Lazarenko_sv@atomtex.com; zaharadniuk_aa@atomtex.com

DOI: 10.37414/2075-1338-2024-119-4-43-58 УДК 621.039.586

Фукусима. Опасность повторной критичности разрушенного топлива

При аварии на трех блоках АЭС Фукусима-1 расплав материалов активной зоны (кориум) разрушил нижнюю часть корпуса реакторов, и часть его пролилась на конструкции, находящиеся в контейнменте. В результате образовались скопления топливосодержащих материалов (ТСМ).

Как кориум, оставшийся в корпусах реакторов, так и ТСМ, могут представлять опасность при возникновении повторной критичности. Это особенно важно учитывать при работах по извлечению их из аварийных блоков.

В настоящей работе рассматриваются меры по ядерной безопасности, принимаемые и планируемые в работах по ЛПА на АЭС Фукусима-1.

Ключевые слова:
АЭС Фукусима-1, топливосодержащие материалы, повторная критичность, извлечение топлива.

А.А.Боровой[1], С.Л.Гаврилов[2], В.А.Хвощинский[1]

[1] Национальный исследовательский Центр «Курчатовский институт», г. Москва
[2] Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН), г. Москва

Введение

Крупнейшие аварии атомных электростанций, произошедшие на энергоблоке № 2 на Три-Майл-Айленд (ТМА), в Чернобыле и на трех первых блоках станции Фукусима-1 (далее, F-1), привели к расплавлению активной зоны. Образовавшийся при этом расплав – кориум – имел температуру до 2000 °С. Он состоял из материала ТВЭЛов, их оболочек, систем управления и продуктов их химических реакций с воздухом и водой.

В случае аварии на ТМА кориум остался в корпусе реактора.

В Чернобыле после взрывов, полностью разрушивших реактор, значительная часть материалов активной зоны попала в подаппаратное помещение, и там при высоких температурах происходило взаимодействие кориума с материалами пассивной защиты

и образование так называемых «чернобыльских лав». В дальнейшем они протекли на нижние отметки блока и там застыли.

Что касается F-1, то при аварии на всех трех блоках кориум расплавил нижнюю часть корпуса аппаратов, и часть его пролилась на конструкции, находящиеся в контейнменте. В том числе, на пьедесталы реакторов. При этом в расплав включились новые материалы, образовав скопления топливосодержащих материалов (далее – ТСМ).

Как кориум, оставшийся в корпусе реактора, так и образовавшиеся ТСМ, могут представлять опасность **повторной критичности** – состояния, при котором **в них возникает самоподдерживающаяся цепная реакция деления ядер**.

Это особенно важно при выводе блока из эксплуатации, когда требуется обеспечить безопасное извлечение из него всех материалов, содержащих топливо, организацию их хранения и(или) захоронения. А это накладывает ряд условий, которые определяются: массой и геометрией скопления ТСМ; содержанием в нем топлива; его обогащением, выгоранием, наличием других материалов – замедлителей и поглотителей; необходимостью учитывать изменение этих параметров при проведении каждой из операций. Например, такой, как перемещение, фрагментация и т. п.

В большинстве случаев для того, чтобы не допустить повторной критичности, в скопление ТСМ вводят поглотители нейтронов – соединения бора, реже, гадолиния, делающих его заведомо безопасным.

Так, при аварии на ТМА использовалась вода, содержащая соединение бора. Ею заполнили корпус реактора, и это позволило безопасно извлечь фрагменты кориума.

В первые дни после аварии на ЧАЭС в разрушенный реактор было сброшено с вертолетов около 40 т карбида бора. В дальнейшем при всех операциях с ТСМ использовались соединения бора или гадолиния (подробнее см. [1]). Все это не исключало необходимость постоянного контроля за критичностью.

В настоящей работе рассматриваются меры по ядерной безопасности, принимаемые и планируемые в работах по ЛПА на F-1.

2. Характеристики кориума и ТСМ, образовавшихся после аварии F-1

Характеристики ядерного топлива, находившегося в трех блоках F-1 перед аварией, приведены в табл.1 [2].

В результате аварии часть сборок расплавилась. При этом максимальную массу образовавшегося кориума можно оценить из следующих соображений.

Табл.1.

Характеристики топлива	1 блок	2 блок	3 блок
Загрузка топлива (тU)	69	94	94
Количество сборок	400	548	548
Обогащение (% ^{235}U)	2,1÷4,9		
Выгорание (Мегаватт-сутки/тU) и число сборок с этим выгоранием	5,2; 64	3,3; 116	4,7; 48*
	15,2; 64	15,8; 116	15,5; 112
	24,2; 80	26,0; 120	28,5; 140
	33,3; 68	35,2; 120	36,2; 112
	37,5; 64	40,6; 76	40,5; 36
	40,2; 60		
Среднее по активной зоне выгорание	25,8	23,1	21,5

*Включены 16 сборок МОХ

В активной зоне 1-го реактора перед аварией находилось: 78,3 тонны диоксида урана; 32,7 тонны циркония; 12,5 тонны стали; 590 кг карбида бора; 1 тонна инконеля (никель-хром жаропрочный сплав). В сумме максимальная масса кориума могла составлять ~125 т [3].

Во втором и третьем блоках этих материалов было по ~170 т в каждом. Итого, в трех реакторах ~465 т.

Не все материалы активной зоны, в том числе сборки, вошли в состав кориума. К настоящему времени опубликованы следующие данные [4] (табл.2). Они основаны на результатах расчетов нескольких институтов, которые отличаются из-за расхождения в оценке эффективности мероприятий по охлаждению аварийных реакторов.

Как уже говорилось, вытекший из корпуса реактора расплав попал на нижние конструкции управления и пьедестал. В результате часть их материалов вошла в состав образовавшихся ТСМ (рис.1).

За 13 лет, прошедших после аварии, были предприняты многочисленные, технически очень сложные, попытки выяснить основные параметры скоплений ТСМ, образовавшихся

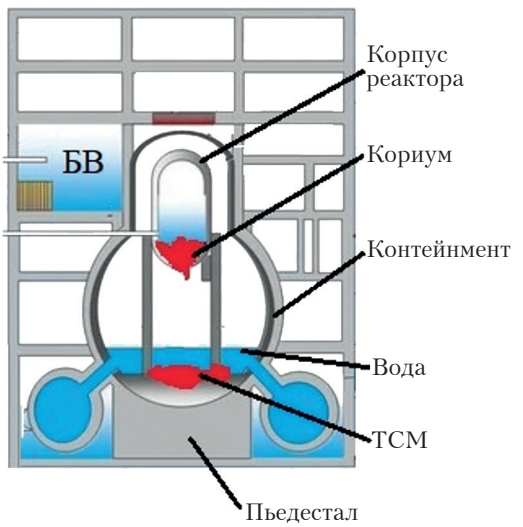


Рис.1. *Состояние аварийного блока F-1 после аварии.*

Табл.2.

Число расплавленных сборок, %	1 блок	2 блок	3 блок
Данные японского агентства по атомной энергии (NEA)	100	~70	~64
Данные Tokyo Electric Power Company (TEPCO) – оператора F-1	100	~57	~63

в поврежденных блоках [1]. Информация о них все еще далеко не полная. Так, до сих пор не известно местоположение основных скоплений, их размеры и элементный состав.

К настоящему времени о ТСМ в блоках известно следующее.

Первый блок.

Раскаленный кориум пролился на нижние конструкции. Он расплавил и частично сжег бетон пьедестала, обнажив стальную арматуру. Расплав застыл в виде своеобразных отложений как внутри, так и вне пьедестала (рис.2 и 3). В TEPCO пришли к выводу, что не менее 90% кориума покинуло корпус реактора.

Второй блок.

Часть кориума осталась в нижней части корпуса реактора. Другая часть вытекла из него и застыла, образовав ТСМ в виде отложений на конструкциях внутри пьедестала (рис.4).



Рис.2. *Обнажившаяся стальная арматура пьедестала и застывшие ТСМ на 1-м блоке.*

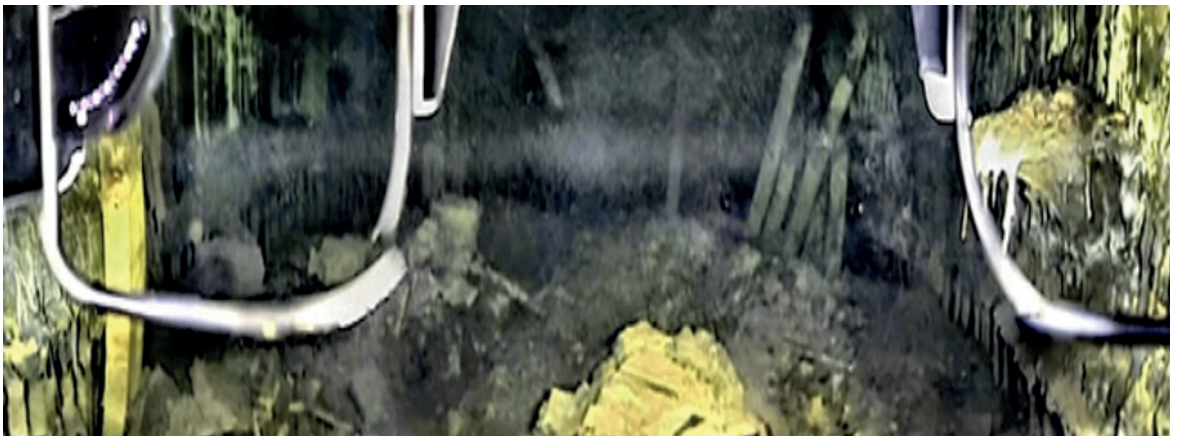


Рис.3. *В результате исследований, проведенных в 2022–2023 гг., TEPCO опубликовала развернутый (панорамный) снимок внутренних областей пьедестала 1-го блока и скоплений отложений внутри него.*

Третий блок.

Расплавленный кориум вытекал из реактора, скорее всего, через технологические отверстия для стержней СУЗ[1]. Взаимодействуя с конструкциями в контейнменте, он образовывал ТСМ. Последние застывали в виде свешивающихся вниз «сталактитов» и своеобразных отложений на конструкциях, на дне конфаймента и его стенках.

Отсутствие экспериментальных данных делает невозможным создать точную модель распространения ТСМ в аварийных блоках. А расчетные оценки имеют большой разброс (табл.3 [5]).

Что касается элементного состава таких скоплений, то их первые образцы специалисты надеются получить только в конце 2024 г., произведя отбор проб на 2-м блоке.

Внешний вид отложений ТСМ даже в одном блоке отличается друг от друга. В том числе, их рыхлость, цвет – от черно-коричневого до красного и т. п. В некоторых скоплениях обнаруживаются нерасплавленные фрагменты топливных сборок и металлических конструкций. Наибольшую известность получила фотография упавшей ручки контейнера топливных стержней среди отложений ТСМ во 2-м блоке, сделанная в 2018 г. (рис.5).



Рис.4. *Второй блок. Опора погрузочно-разгрузочной машины среди отложений на основании пьедестала.*

[1] Не исключено, что произошло и частичное расплавление металла корпуса реактора.

Табл.3.

Местоположение кориума		Вес ТСМ, т	Вес ТСМ, т	Вес ТСМ, т
		Блок 1	Блок 2	Блок 3
Корпус реактора	Активная зона	0÷3	0÷51	0÷31
	Низ корпуса	7÷20	25÷85	21÷79
Местоположение ТСМ				
Внутри контейнмента	Внутри пьедестала	120÷209	102÷223	92÷227
	Вне пьедестала	79÷153	3÷142	0÷146
Всего		232÷357	189÷390	188÷394

Длина топливных сборок составляет около 4 м, ручка установлена на ее верхнем конце. Это указывает, что сборка должна была расплавиться, а расплав вытечь из корпуса реактора.

3. Оценка возможности повторной критичности в корпусе реакторов и вне него, в скоплениях ТСМ

В каком случае при существующих общих характеристиках топлива реакторов F-1, эффективный коэффициент размножения нейтронов ($K_{эфф}$) может стать ⩽1?

Сначала приведем наиболее опасный случай, возникающий при заливе аварийного топлива водой. Для его рассмотрения мы воспользуемся материалами работ [6,7], в которых определялся K_∞ для бесконечной гомогенной смеси UO_2 и H_2O (рис.6).

Кривые зависимости K_∞ от отношения числа атомов водорода к атомам урана построена для двух значений выгорания топлива – свежего с нулевым выгоранием и с выгоранием 21,5 МВ·сутки/тU. Последнее значение представляет собой среднее значение для сборок на 3-м блоке F-1[2] (табл.1).

В табл.4 приведены некоторые характеристики системы при заданном соотношении H/U. Из приведенных зависимостей видно, что опасная область ($K_\infty \geqslant 1$), возникающая при заливе топлива водой, даже для среднего выгорания достаточно велика (лежит в пределах содержания урана от 500 г/л до 2000 г/л). При этом



Рис.5. *Ручка контейнера топливных стержней среди отложений ТСМ во 2-м блоке.*

[2] Опыт, полученный на ТМА, показал, что для оценки критичности величина среднего выгорания достаточно точно описывает поведение топливных скоплений. Это подтвердили многочисленные анализы проб ТСМ.

Табл.4.

Отношение числа атомов водорода к числу атомов урана, H/U	0,7	2,0	10	50	60
Концентрация урана (г/литр)	7700	5600	2000	500	420
Содержание воды (объемных %)	20	42	79	95	96

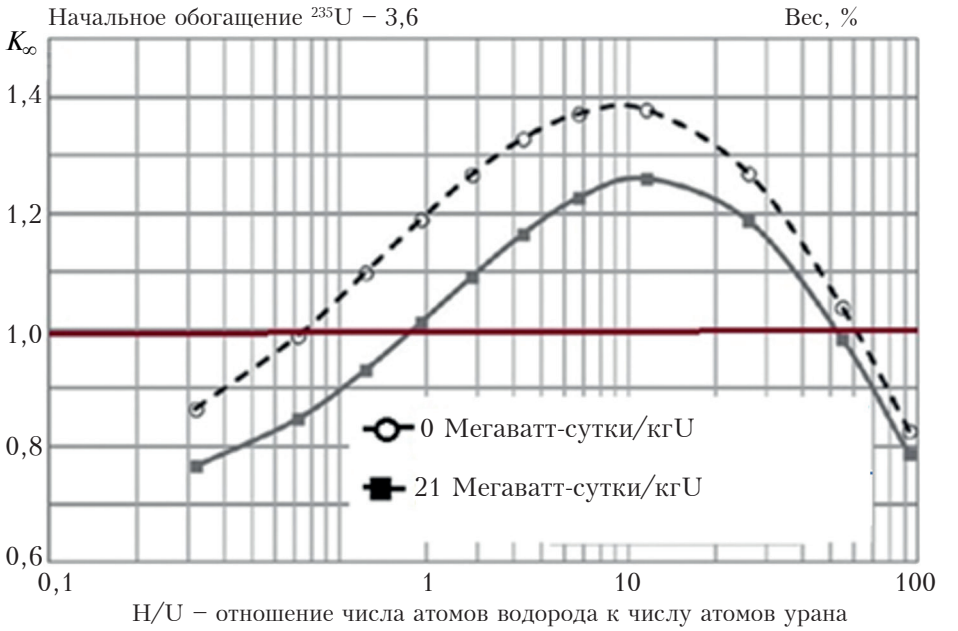


Рис.6. *K∞ в зависимости от отношения H/U.*

систему можно считать бесконечной и $K_{эфф}$ близким к K_∞ при полном количестве урана, превышающего 70 тонн [3].

Насколько близка такая идеальная модель к реальной ситуации? Ведь в кориуме должны присутствовать многочисленные примеси к системе $UO_2 - H_2O$, которые могут повлиять на величину $K_{эфф}$.

Циркалой (сплав циркония) практически не влияет на критичность из-за малого поперечного сечения поглощения нейтронов.

Железо (в составе стальных конструкций). Его сечение поглощения нейтронов во много раз больше, чем у циркалоя, и присутствие Fe приводит к уменьшению $K_{эфф}$. Следует учитывать и железо, вошедшее в состав кориума от поврежденного корпуса реактора.

Материалы системы управления. Стержни управления изготовлены из материалов, поглощающих нейтроны, таких как карбид бора (B_4C). Они представляют собой трубки из нержавеющей стали, заполненные гранулами B_4C. Наличие даже небольших количеств бора

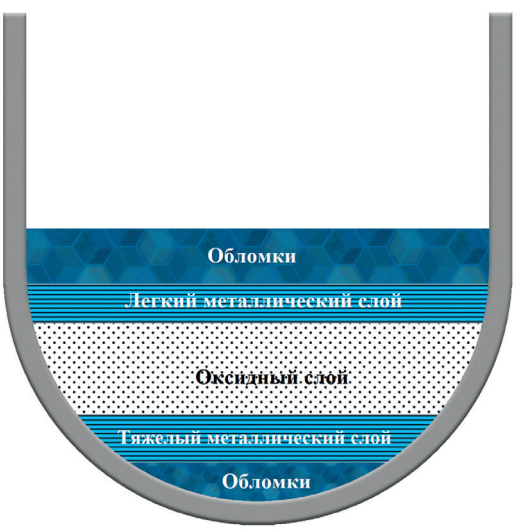


Рис.7. *Модель кориума, использованная в работе [9].*

[3] В сферической геометрии.

Табл.5.

Группа нуклидов и материалов	Местоположение	
	В нижней части корпуса реактора (на основе результатов исследований ИБРАЭ)	Вне корпуса реактора (на основе результатов исследований IN. INV.)
Топливо UO_2/U_3O_8 и продукты деления	0,59	0,51
Оксиды циркония	0,09	0
Цирконий в металлической форме	0	0,165
Нержавеющая сталь	0,32	0,31
Оксиды	0	0
B_4C	0	0,015

в кориуме существенно снижает $K_{эфф}$. На F-1 в реакторных блоках 1, 2 и 3 содержалось 680, 960 и 960 кг B_4C соответственно. При равномерном распределении такого количества бора в кориуме $K_{эфф}$ заведомо меньше 1.

Однако можно предполагать, что в процессе плавления материалов активной зоны часть бора будет потеряна.

Во время образования кориума температура тепловыделяющих сборок, по оценкам, достигла > 2000 °C. Карбид бора плавится при 2450 °C. Однако эвтектическое взаимодействие B_4C с прилегающей нержавеющей сталью приводит к его разжижению уже при температурах, превышающих 1200 °C. В результате, как показали исследования, некоторые из управляющих стержней могли улетучиться.

Произошло ли это на реакторах F-1? Какая часть бора испарилась из кориума? В настоящее время вопрос остается открытым.

При работе реактора в топливе происходит накопление нейтрон-поглощающих осколков деления (уменьшение $K_{эфф}$) и образование делящихся актинидов (увеличение $K_{эфф}$). Уменьшается число ядер поглотителя. В состав кориума могут войти соли морской воды, которой охлаждались реакторы F-1 первое время после начала аварии. Они уменьшают $K_{эфф}$. Образовавшийся кориум неоднороден. Согласно многочисленным расчетным и экспериментальным работам (см., например, [8]) в нем образуются несколько слоев.

Так называемый металлический слой, состоящий в основном из нержавеющей стали, Zr, а также материалов системы управления, и оксидный слой. Последний включает в себя оксиды урана и циркония, а также продукты деления, образовавшиеся при работе реактора. Слой оксида находился в нижней части корпуса из-за его более высокой плотности.

В ряде работ используется модель кориума с тремя слоями: легким слоем, оксидным слоем и тяжелым слоем (рис.7).

Наиболее полно поведение кориума в реакторах F-1 было исследовано в расчетных работах объединения «Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant» – «Сравнительное исследование аварии на атомной электростанции Фукусима Daiichi» (BSAF) [10] с помощью кодов анализа тяжелых аварий[4].

На основании проведенных расчетов ИБРАЭ РАН опубликовал работу [11], в которой, в частности, приводился предполагаемый нуклидный состав кориума, оставшегося в нижней части корпуса 3 реактора и вытекшего из корпуса в контейнмент. Эти данные (в относительных единицах) приведены в табл.5.

Такое распределение не исключает образование в корпусе реактора областей, в которых

[4] Использовались такие коды, как MELCORE, TOLBIAC, ASTEC, THALES, MAAP, SAMPSON, HYSPLIT, SOCRAT.

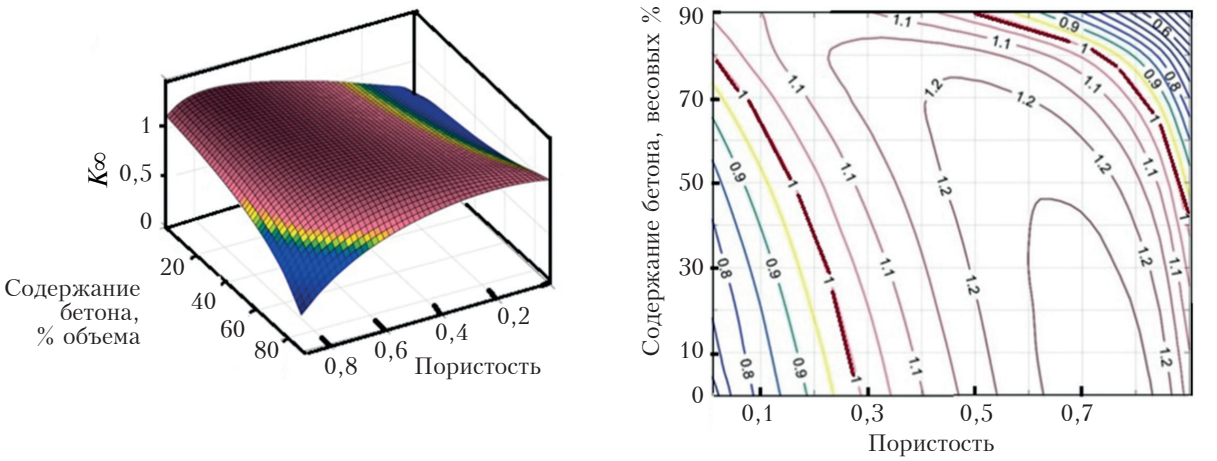


Рис. 8. *K_∞ систем UO_2 + бетон, погруженных в воду. А) 3-D-представление. Б) 2-D-представление.*

значение $K_{эфф}$ в присутствии охлаждающей воды достигнет 1.

Попав на пьедестал, высокотемпературный поток взаимодействует с бетоном, образуя ТСМ.

Какие прогнозы о $K_{эфф}$ можно при этом сделать?

Бетон, использовавшийся при строительстве F-1, относится к кремнистому типу, который содержит в основном SiO_2 [5].

Диоксид кремния имеет небольшое сечение поглощения нейтронов и его присутствие мало влияет на критичность системы. Другое дело – содержащаяся в бетоне вода – замедлитель. Она присутствует в двух видах: абсорбированная (свободная) вода и химически связанная (в составе гидратов, например, $Ca(OH)_2$).

Потеря воды бетоном при его контакте с расплавленным кориумом происходит в несколько стадий. Сначала при 105 ÷ 120 °С испаряется свободная вода. Связанная вода уходит при температуре 100 ÷ 850 °С. При дальнейшем повышении температуры до 1100 ÷ 1250 °С бетон начинает плавиться.

Процесс взаимодействия кориума и бетона (так называемый процесс MCCI – Molten Corium – Concrete Interaction) приводит к абляции (разрушению) бетона. Он идет с типичной скоростью от 6 до 13 сантиметров в час и сопровождается выделением газов, что приводит к разрыхлению ТСМ и появлению пор. При этом из-за неравномерности остывания расплава часть связанной воды может оставаться в ТСМ. При охлаждении и повторном заливе ТСМ водой последняя не только попадает в образовавшиеся поры, но и вновь входит в состав топливосодержащих материалов [6].

В течение последних лет MCCI исследовался в целом ряде экспериментальных и расчетных работ. К сожалению, из-за его сложности результаты их носят скорее оценочный характер.

Мы приведем в качестве примера модель, использованную в работе [5]. В ней рассматривалась опасность возникновения критичности для образовавшихся в пьедестале ТСМ, состоящих из сплава топлива (с выгоранием 12 МВт-сутки/тU) и бетона (со связанной

[5] Состав бетона в пьедестале оценивался по образцам, отобранным из реакторного здания 1-го энергоблока F-1.

[6] Поскольку бетон состоит в основном из SiO_2, $CaCO_3$ и H_2O, его разложение приводит к выделению газов и плавлению остаточных оксидов (SiO_2 и CaO), которые добавляются в состав кориума. Таким образом, ТСМ содержат тяжелые оксиды активной зоны реактора (UO_2 и ZrO_2), легкие оксиды бетона (в основном SiO_2 и CaO), металлы (Fe, Cr, Ni и Zr) и, возможно, бор от систем управления.

водой). Материал представляет собой пористую структуру из отдельных частиц диаметром 10,7 мм, погруженных в воду. Величина K_∞ определялась для двух параметров – объемного содержания бетона и пористости (доли объема пор в общем объеме). На рис.8 результаты представлены двумя различными способами: график в виде 3D поверхности K_∞ и двумерный график.

Из приведенных графиков видно, что повторная критичность достижима для широкого диапазона возможных комбинаций пористости и содержания бетона. Кроме того, при относительно высоком содержании бетона и малой пористости значение K_∞ может достигать 1. Это указывает на то, что бетон достаточно эффективно замедляет нейтроны, что, прежде всего, обусловлено остаточным содержанием связанной воды.

Наличие в составе кориума бора (от систем управления) значительно уменьшает или вовсе предотвращает вероятность наступления повторной критичности.

Однако нельзя утверждать, что он распределен в расплаве равномерно, а не концентрируется в одном слое. Или, как говорилось выше, частично испарился [12].

Из сказанного следует, что на основе имеющейся информации **нельзя исключать возникновения повторной критичности как в кориуме, так и в образованных им скоплениях ТСМ**. Вероятность ее появления следует учитывать при любых перемещениях этих материалов.

Это делает необходимым создание системы мониторинга подкритичности ТСМ и системы аварийного реагирования.

Как говорилось во Введении, перемещение ТСМ может произойти в процессе их извлечения и при природных катаклизмах.

Опасность землетрясения стала более конкретной после того, как при исследованиях,

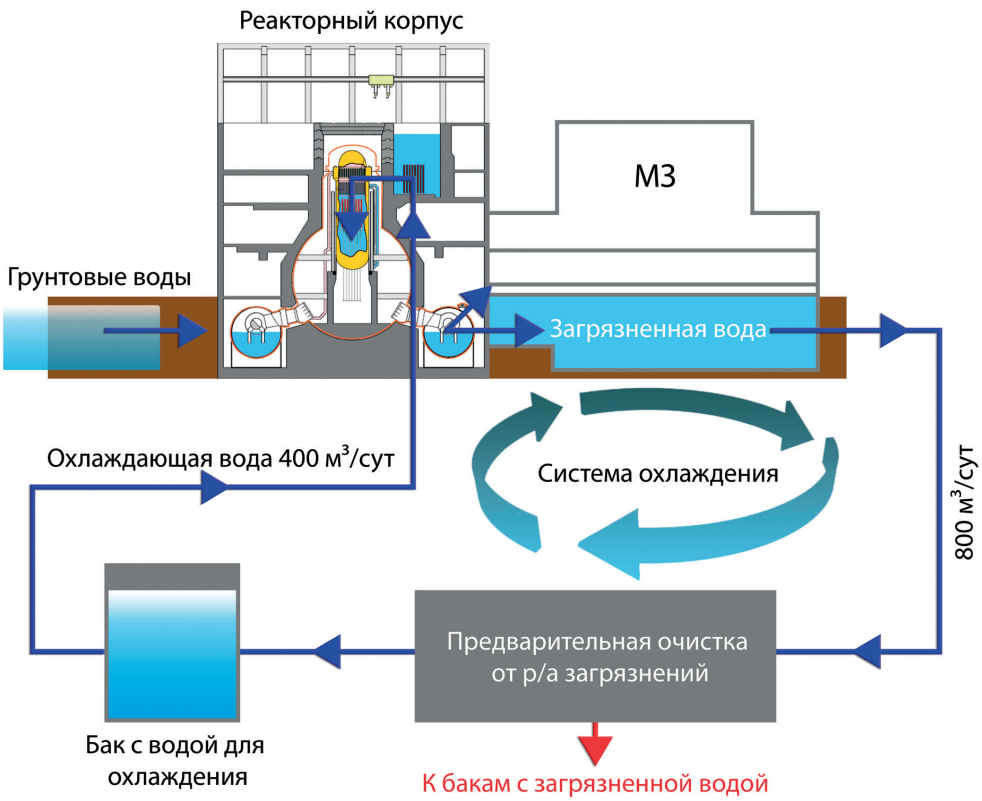


Рис.9. *Схема охлаждения реактора (середина 2015 г.). Из 800 м³ загрязненной воды, попадающей на нижние отметки блока, ~400 м³ после очистки поступает в систему охлаждения, а ~400 м³ закачивается в баки.*

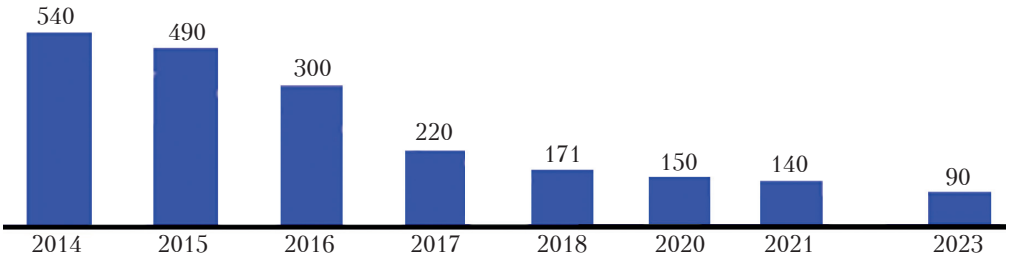


Рис.10. *Динамика среднего ежедневного поступления в баки радиоактивной воды (м³).*

проведенных на 1-м блоке в 2022–2023 гг., обнаружилось, что во время аварии бетон пьедестала, на который опирается реактор, сильно поврежден (рис.2). Подробнее это будет обсуждено ниже.

4. Поведение ТСМ за прошедшее время

В отличие от ТМА на F-1 не удалось организовать предотвращение вторичной критичности с помощью борирования воды, охлаждающей ТСМ. Причина заключалась в том, что в результате аварии в контур охлаждения поступало большое количество грунтовых вод, проникающих на нижние отметки аварийных блоков (рис.9). Избыток воды накапливался в баках на территории станции.

К моменту, когда начался слив загрязненной воды из баков в океан, к августу 2023 г. полное количество ее на площадке станции составляло 1,3 миллионов кубометров (рис.10). Очевидно, что борирование такого количества воды превратилось бы в сложную техническую проблему и потребовало бы значительных затрат.

Японские специалисты понимают, что появление повторной критичности может произойти при изменении состояния скоплений ТСМ, хотя и будет носить локальный характер.

Тем не менее, вспышка цепной реакции представляет опасность и, прежде всего, для находящегося на блоке или рядом с ним персонала. Задачей ликвидаторов стало обнаружение и эффективное реагирование на опасное событие. Обнаружить его приближение можно по увеличению нейтронного потока вблизи скопления, повышению температуры и появлению короткоживущих изотопов.

Для предотвращения возможных критических инцидентов на F-1 установили два резервуара с водой с растворенным в ней



Рис.11. *Система впрыска соединения бора на F-1 (баки системы указаны стрелкой).*

соединением бора (один резервуар запасной) (рис.11). Она может подаваться через систему впрыска охлаждающей жидкости в реактор.

Первая тревога прозвучала 1 ноября 2011 г. через неделю после того, как был налажен отбор проб газа из корпуса 2-го реактора. В газовых пробах, отбираемых из контейнмента, обнаружили присутствие ^{135}Xe (рис.12).

Изотоп имеет период полураспада 9,14 часа и образуется в процессе деления ядерного топлива. Его обнаружение могло служить указанием на повторную критичность ТСМ и вызвало оживленную реакцию в масс-медиа.

Однако оператор станции привел убедительные доказательства, что это не так.

Во-первых, оценки показывали, что наблюдаемое малое количество ^{135}Xe связано со спонтанным делением изотопов урана, плутония и трансуранов, образовавшихся за время работы в топливе реактора (основной вклад в его образование дают ^{242}Cm, ^{244}Cm) (рис.12 и 13).

Во-вторых, ^{135}Xe регистрировался и после того, как в реактор ввели раствор борной кислоты.

В-третьих, не наблюдалось существенных изменений в контролируемых параметрах во всех частях блока – температуры, давления, величинах нейтронных потоков.

В дальнейшем на F-1 именно обнаружение избыточного присутствия изотопов ксенона-133 ($T_{1/2}$ – 5,2 суток) и ксенона-135 в газовых пробах стали использовать как один из основных методов контроля критичности в аварийных реакторах.

Второе тревожное событие, связанное с возможностью возникновения повторной критичности в 1-м блоке, произошло в марте 2022 г. F-1 снова стала жертвой землетрясения магнитудой 7,4.

Опасения того, что обнажившийся арматурный каркас пьедестала потеряет прочность, что вызовет обрушение реактора и не предсказуемые изменения в геометрии ТСМ, не подтвердились.

Управляющая компания заверила регулирующие органы, что прочность каркаса достаточна для удержания нагрузки.

Однако с нашей точки зрения, проблема эта до конца не решена, и выводы, сделанные TEPCO, чрезмерно оптимистичны.

Во-первых, всегда существует риск более сильного землетрясения.

Во-вторых, за время работы по выводу F-1 из эксплуатации (30–40 лет) можно ожидать несколько более слабых землетрясений,

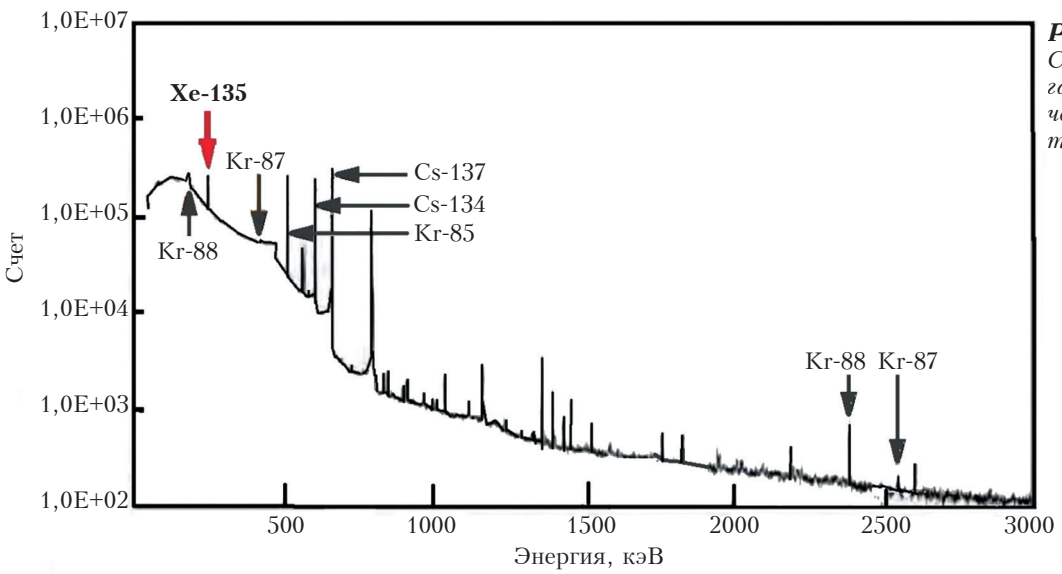


Рис.12. *Спектр гамма-излучения в реакторе F-1.*

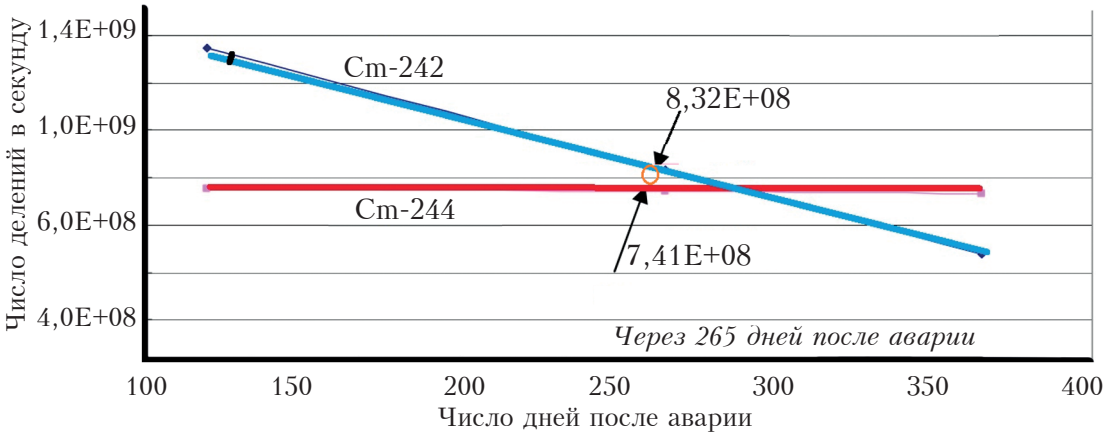


Рис.13. *Число спонтанных делений ^{242}Cm и ^{244}Cm в отработавшем топливе 2-го блока F-1.*

совокупность которых приведет к постепенному разрушению каркаса.

Тем не менее, в течение всего времени наблюдения (более 13 лет) активность ^{133}Xe и ^{135}Xe в реакторах F-1 оставалась существенно ниже принятого уровня безопасности – 1 Бк/см^3. В блоках не было зарегистрировано никаких аномалий нейтронных потоков. Таким образом, как застывший кориум, так и образовавшиеся ТСМ, находились в подкритическом состоянии. Как уже отмечалось, положение может измениться при работах по их извлечению и захоронению [7].

5. Планируемые работы по извлечению ТСМ

К настоящему времени специалисты TEPCO считают второй блок самым перспективным для начала проведения операций по извлечению ТСМ. Это связано с рядом объективных причин. Здание блока не было разрушено взрывом и это облегчает защиту внешней среды от радиоактивной пыли при проведении масштабных работ.

Дозовая обстановка в помещениях на первом этаже реакторного корпуса оказалась значительно лучше, чем на 1-м и 3-м блоке.

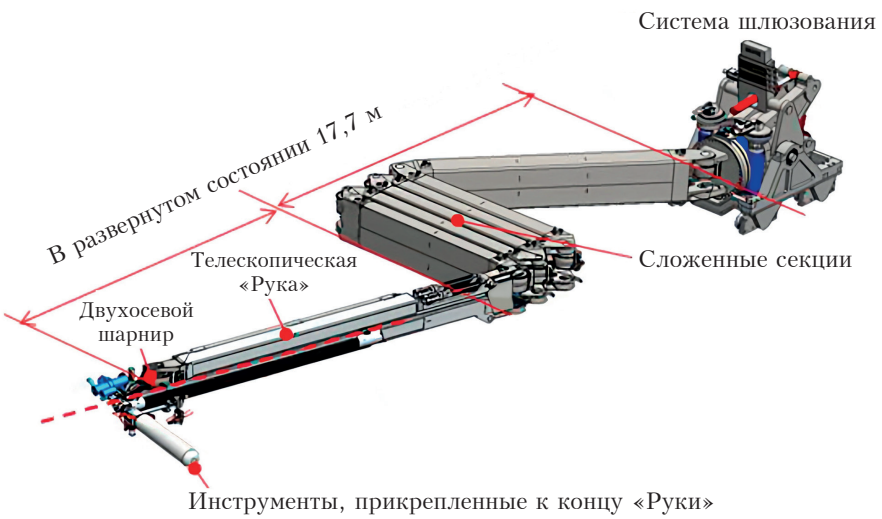


Рис.14. *Робот «Рука». Общая длина «Руки» с тележкой около 22 м.*

[7] Надо иметь в виду, что даже при отсутствии внешних воздействий, при понижении температуры ТСМ их критичность увеличивается.



Инструмент «Щетка»



Инструмент «Вакуумный отсос»

Рис.15. *Инструменты «Рука».*

Согласно планам, процесс извлечения ТСМ из 2-го блока должен происходить в несколько этапов. На первом создается робот «Рука» (рис.14), способный проникать в пьедестал и извлекать оттуда сначала небольшие образцы, а затем и более крупные скопления ТСМ. Для его работы на месте входа X-6 монтируется шлюзовая система проникновения, обеспечивающая безопасное проведение работ.

На дальнейших этапах, при получении положительных первых результатов, на их основе система трансформируется. «Рука» увеличивается и укрепляется для повышения грузоподъемности и извлечения уже больших объемов ТСМ. Отрабатываются методы их локализации, перемещения и временного хранения.

Таким образом, конструкция «Руки» должна предусматривать самые разные функции и возможность дальнейшей модернизации.

На конце «Руки» первоначально монтируется «металлическая щетка», способная сметать с поверхности частицы и обломки, и «вакуумный отсос», засасывающий их (рис.15).

На начальном этапе извлечения ТСМ, когда отбираются небольшие пробы, это практически не может привести к возникновению вторичной критичности. Ситуация изменится, когда необходимо будет извлекать большие объемы (по оценкам TEPCO полный вес образовавшихся в аварийных реакторах ТСМ превышает 800 т).

Японское агентство по атомной энергии (JAEA) по заказу Управления ядерного регулирования Японии (NRA) в настоящее время работает над исследовательской программой для создания системы контроля критичности, которая будет использоваться во время работ по извлечению ТСМ.

Программа состоит из трех основных мероприятий:

- вычисление основных характеристик критичности обломков топлива;
- разработка метода оценки риска критичности;
- проверка результатов расчетов с помощью критических экспериментов.

До сих пор не было достаточно экспериментальных данных, необходимых для проверки расчетных работ по повторной критичности скоплений ТСМ. Сейчас JAEA модернизирует установку STACY – критическую сборку, находящуюся в Исследовательском центре по безопасности ядерного топливного цикла, для проведения необходимых исследований.

В процессе расширения масштабов резки и извлечения необходимо принять меры по постоянному мониторингу активности короткоживущих газов и величины потока нейтронов, а также подготовке к введению в скопления ТСМ поглотителей.

Что касается нейтронов, то с точки зрения инженерно-технического обеспечения предстоит сделать следующее (рис.16):

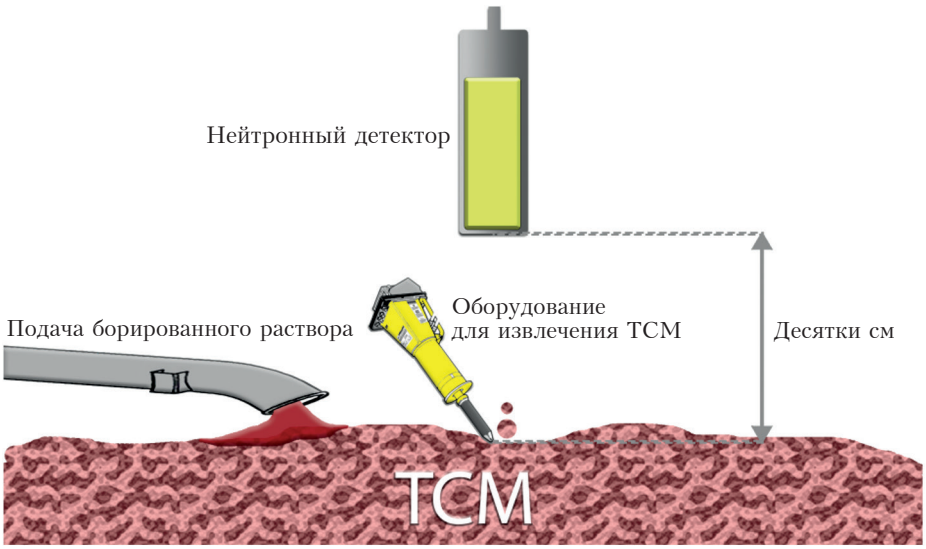


Рис.16. *Схема измерения потока нейтронов и подачи борсодержащего раствора при извлечении ТСМ.*

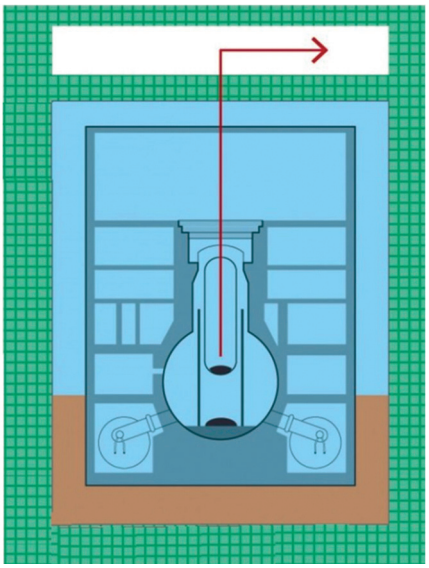


Рис.17. *Схема предложенного в 2022 г. метода погружения с полной герметизацией и доступом сверху для 3-го блока F-1.*

- выбрать соответствующий тип детекторов, способных достаточно долгое время работать в условиях больших радиационных полей (возможно, предусмотреть свинцовую защиту от рентгеновского и γ-излучения);
- обеспечить возможность их размещения и замены в помещении проведения работ;
- спроектировать систему введения в скопление поглотителя нейтронов (например, раствора пентабората натрия);
- оптимизировать время реагирования на обнаружение опасного события и вмешательства;
- и наконец, обеспечить условия безопасного проведения всех работ на этапах сортировки, сбора, переработки и хранения ТСМ.

В сентябре 2022 г. Корпорация по компенсации ядерного ущерба и выводу из эксплуатации (NDF) заявила, что для 3-го блока F-1 будет изучаться вариант извлечения ТСМ, при котором здание реактора окружено стальной оболочкой и залито водой [13]. Таким образом, рассматривается метод погружения с полной герметизацией и доступом сверху (рис.17).

Строительство ограждающих барьеров и систем безопасности предполагает снос окружающих зданий и сооружений, создание новых крупных сооружений. Все это приводит к значительному увеличению объемов и стоимости работ.

При полном погружении огромное количество используемой воды, будет загрязнено радиоактивностью. Это представляет серьезную опасность при разгерметизации конструкции, например, в результате землетрясения.

Президент NDF Хаджимо Янама сказал в своем интервью: «Пока ничего не известно наверняка (о возможности метода полного

погружения). Мы все еще находимся на очень ранних стадиях разработки концепции. Еще многое предстоит изучить, поскольку попытка такого рода станет первой в мире».

С другой стороны, такой подход позволяет надежно предотвратить повторную критичность ТСМ путем растворения в воде необходимого количества соединений, содержащих бор.

6. Заключение и выводы

В заключение мы хотели бы еще раз остановиться на главных выводах из рассмотренного материала.

1. Нельзя исключать возникновения повторной критичности как в кориуме, так и в образованных им скоплениях ТСМ при извлечении их из аварийных блоков.

2. Это делает необходимым создание системы мониторинга подкритичности и си-стемы аварийного реагирования.

3. Следует считать актуальным выработку детальной программы по ядерной без-опасности, планируемой NRA.

Литература

1. **Боровой А.А., Велихов Е.П. Опыт Чернобыля, часть 1. М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2012. 168 с.**
2. **K. Nishihara, H. Iwamoto, K.,** *Suyama Estimation of fuel compositions in Fukushima-Daiichi nuclear power plant***, JAEA-DATA/CODE−2012-018. Tokai, Ibaraki (Japan): Japan Atomic Energy Agency.**
3. **F. Tanabe, «Analysis of Core Melt Accident in Fukushima Daiichi-Unit 1»,** *Journal of Nuclear Science and Technology***, vol. 8, pp. 1135-1139, 2011.**
4. **M.L. Susie Hardie, G. Ian McKinley et. al., «Management options for Fukushima corium»,** *Progress in Nuclear Energy***, no. 92, pp. 260-266, 2012.**
5. **M.F. Lypez, Numerical Evaluation of Criticality in Debris Beds formed during Severe Accidents in Light Water Reactors, Stuttgart University (Germany), 2021, 176 p. ISSN 0173-6892. URL: http://dx.doi.org/10.18419/opus-11646 (дата обращения: 28.10.2024).**
6. **K. Nakajima. Issues on Criticality Safety Control of Fuel Debris -Preparation for the Decommissioning of Reactors at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. URL: https://www.aesj.net › document › Vol2_22_191-198_web (дата обращения: 28.10.2024).**
7. **H. Okuno, K. Suyama, Tonoike et. al. «Second version of data collection part of nuclear criticality safety handbook (Contract Research). Technical report»,** *Japan Atomic Energy Agency***. URL: https://jopss.jaea.go.jp/search/servlet/search?5018398&language=1 (дата обращения: 28.10.2024).**
8. **Асмолов В.Ф., Абалин С.С., Бешта С.В. и др. Расплав. Удержание расплавленных материалов активной зоны водоохлаждаемых реакторов. РЭА. Москва, 2018. 562 с.**
9. **A.M. Badawi, M. Aboualo, Shaat at al. An investigation of corium in Fukushima Daiichi Unit-1 accident Applied Radiation and Isotopes, no. 186, pp. 110-264, 2022. URL: https://www.researchgate.net/publication/360647388 (дата обращения: 28.10.2024).**
10. **NEA OECD. Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Summary Report. NEA/CSNI/R 18. − NEA OECD, 2015, 53 p.**

11. Рыжов С.Н., Богданова Е.В., Рыжов А.А. и др. Анализ методов и технологий оценки состава кориума, образовавшегося в результате аварии на АЭС «Фукусима Дайити»//Глобальная ядерная безопасность. 2022. No. 3(44). С. 5-21.

12. K. Fueda, R. Takami, K. Minomo at al., «Volatilization of B4C control rods in Fukushima Daiichi nuclear reactors during meltdown: B–Li isotopic signatures in cesium-rich microparticles», *Journal of Hazardous Materials*, vol. 428, April 2022, pp. 128-214.

13. New submersion method added as option to aid Fukushima. URL: https://english.kyodonews.net/news/2022/09/f07c0d719b85-new-submersion-method-added-as-option-to-aid-fukushima-debris-cleanup.html (дата обращения: 28.10.2024).

Fukushima. The Danger of Re-Criticality of Destroyed Fuel

Borovoi Aleksandr[1], Gavrilov Sergei[2], Khvoshinskiy Valery[1]

[1] National Research Center Kurchatov Institute (NRC KI), Moscow, Russia

[2] Nuclear Safety Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. **During the accident at three units of the Fukushima-1 Nuclear Power Plant (NPP) the melt of the core materials (corium) destroyed the lower part of the reactor vessels, and some of the corium spilled onto the structures in the containment. As a result, accumulations of Fuel-Containing Materials (FCM) were formed.**

In the event of re-criticality both the corium remaining in the reactor vessels and FCM may pose a hazard. Thus when extracting them from damaged NPP units, such hazards must be dully accounted for.

The paper focuses on nuclear safety measures both taken and planned in the elimination of the Fukushima-1 NPP accident consequences.

Keywords: *Fukushima-1 Nuclear Power Plant (NPP), Fuel-Containing Materials (FCM), Recriticality, Fuel Extraction.*

А.А.Боровой (Советник Почетного Президента Центра)[1], С.Л.Гаврилов (зав. отделением)[2], В.А.Хвощинский (зам. рук. отделения)[1]

[1] Национальный исследовательский Центр «Курчатовский институт», г. Москва

[2] Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН), г. Москва

Контакты: тел. (495) 955-22-36; gav@ibrae.ac.ru

DOI: 10.37414/2075-1338-2024-119-4-59-69 УДК 543.08:539.165

Стандартная неопределенность измерения объемной активности методом деконволюции β-спектра смеси радионуклидов на основе кусочно-комбинированных функций с кусочно-линейной аппроксимацией их параметров

В.Э.Введенский
(Южно-Уральский Институт Биофизики, Челябинская область, г. Озерск)

Представлен способ вычисления стандартной неопределенности измерения объемной β-активности методом деконволюции β-спектра смеси радионуклидов на основе кусочно-комбинированных функций с кусочно-линейной аппроксимацией их параметров. Метод с описанным способом вычисления стандартной неопределенности предназначен для определения β-излучающих радионуклидов в пробах окружающей среды, в пробах биосубстратов, в технологических пробах с использованием жидкостного сцинтилляционного спектрометра с автоматическим определением параметра спектрального гашения внешнего стандарта SQP(E). Метод относится к области радиоэкологического мониторинга, охране окружающей среды, индивидуального дозиметрического контроля работников. На метод интерпретации β-спектра выдан патент Российской Федерации RU 2746412 от 04.12.2019. На основе представленного метода идентификации β-излучающих радионуклидов в пробах с описанным способом вычисления стандартной неопределенности было создано программное обеспечение Aspect-SUBI.

Ключевые слова:
стандартная неопределенность, жидкостной сцинтилляционный счетчик, программное обеспечение Aspect-SUBI, спектр, библиотека модельных спектров, радиоэкологический мониторинг, охрана окружающей среды.

Результат измерения является только аппроксимацией или оценкой значения измеряемой величины и, таким образом, будет полным только в том случае, если он сопровождается указанием неопределенности этой оценки [1]. В данной статье представлен способ вычисления стандартной неопределенности измерения объемной β-активности (далее – активности) методом деконволюции β-спектра смеси радионуклидов на основе кусочно-комбинированных функций с кусочно-линейной аппроксимацией их параметров. Метод разложения β-спектра смеси радионуклидов на основе кусочно-комбинированных функций с полиномиальной или кусочно-линейной аппроксимацией их параметров подробно описан в [2,3]. Метод с полиномиальной аппроксимацией не рассматривается в этой статье, поскольку показал,

в среднем, бóльшие значения стандартной неопределенности, чем метод с кусочно-линейной аппроксимацией.

В практике специалистов ЮУрИБФ существуют задачи интерпретации непрерывного β-спектра, полученного на установке Quantulus-1220: при измерении проб мочи профессиональных работников ПО «Маяк» и жителей г. Озерска, содержащих ^{3}H и ^{40}K, без пробоподготовки; при измерении проб воды оз. Кызылташ (промышленный водоем В-2 ПО «Маяк»), содержащих ^{3}H и ^{90}Sr+^{90}Y, после исключения примесей и взвесей на бумажном фильтре «Синяя лента» [2].

Материалы и методы

В жидкостном сцинтилляционном препарате могут происходить процессы, приводящие к снижению доли энергии ионизирующей частицы, затрачиваемой на собственно сцинтилляционный процесс, т. е. к уменьшению квантового выхода флуоресценции, или гашению. Величина параметра спектрального гашения внешнего стандарта SQP(E) (Spectral Quench Parameter of the External Standard) характеризует гашение. Подробнее о SQP(E) (см. [4]).

Схема измерения объемной активности представлена на рис.1. В [2,3] подробно описано построение библиотеки модельных спектров и процесс измерения объемной активности смеси радионуклидов. Цель данной работы – вычислить стандартную неопределенность объемной активности (блоки со штриховыми линиями на рис.1).

В библиотеке спектров хранится аппроксимация функции изменения модельного спектра в зависимости от уровня гашения в виде непрерывной кусочно-линейной функции [5].

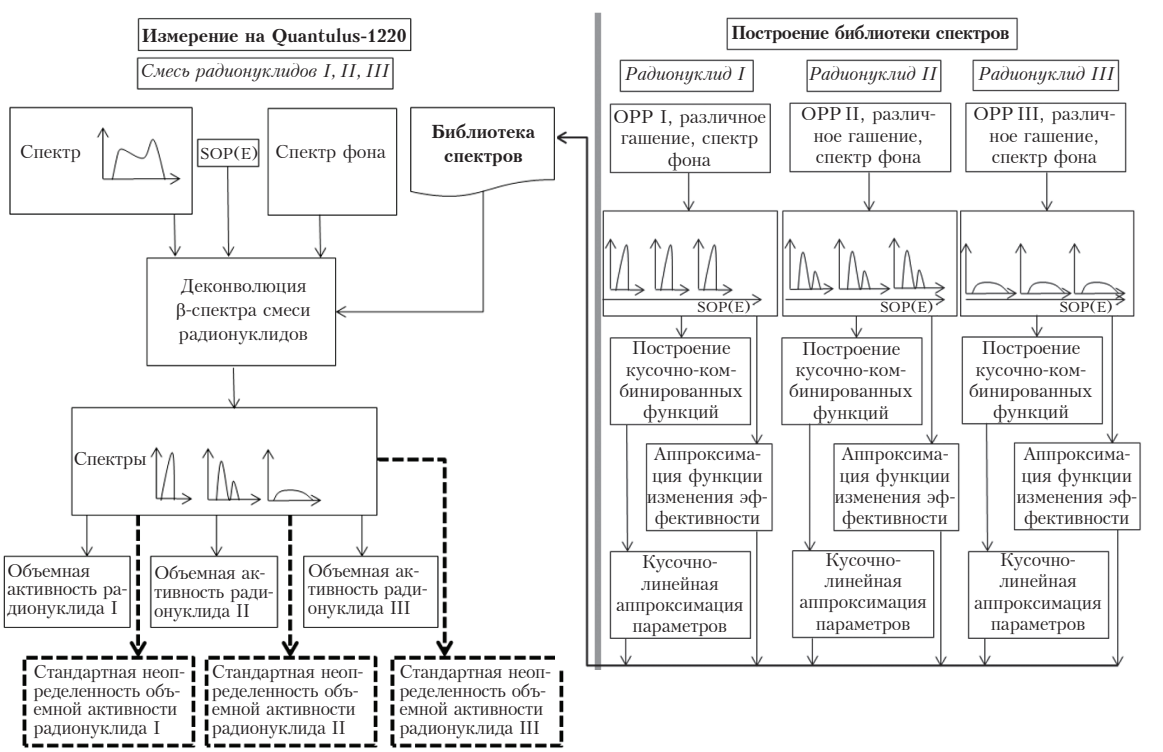


Рис.1. *Схема измерения объемной активности методом деконволюции b-спектра смеси радионуклидов на основе кусочно-комбинированных функций с кусочно-линейной аппроксимацией их параметров. ОРР – это образцовые радионуклидные растворы.*

Модельный спектр для *j*-го радионуклида для известного гашения $g = const$ из библиотеки, хранящейся в БД, имеет вид:

$$M_{i,j}(g) = M_j(i,g) = \sum_{l=1}^{L} f_j^l(i,g), \tag{1}$$

$$f_j^l(i,g) = \begin{cases} \dfrac{S_j^l(g)\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}\left(\sigma_{1,j}^l(g) + \sigma_{2,j}^l(g)\right)} e^{\frac{-\left(i-\xi_j^l(g)\right)^2}{2\left(\sigma_{1,j}^l(g)\right)^2}}, & i \le \xi_j^l(g), \\ \dfrac{S^{k,l}\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}\left(\sigma_{1,j}^l(g) + \sigma_{2,j}^l(g)\right)} e^{\frac{-\left(i-\xi_j^l(g)\right)^2}{2\left(\sigma_{2,j}^l(g)\right)^2}}, & i > \xi_j^l(g) \end{cases} \tag{2}$$

Параметры $S_j^l(g), \xi_j^l(g), \sigma_{1,j}^l(g), \sigma_{2,j}^l(g)$ для *i*-й энергетической линии *j*-го радионуклида аппроксимируются кусочно-линейными функциями:

$$\begin{aligned} S_j^l(g) &= S_l^k \frac{g_{k+1}-g}{g_{k+1}-g_k} + S_l^{k+1} \frac{g-g_k}{g_{k+1}-g_k},\ g_k \le g \le g_{k+1},\ 1 \le k < K, \\ \xi_j^l(g) &= \xi_l^k \frac{g_{k+1}-g}{g_{k+1}-g_k} + \xi_l^{k+1} \frac{g-g_k}{g_{k+1}-g_k},\ g_k \le g \le g_{k+1},\ 1 \le k < K, \\ \sigma_{1j}^l(g) &= (\sigma_1)_l^k \frac{g_{k+1}-g}{g_{k+1}-g_k} + (\sigma_1)_l^{k+1} \frac{g-g_k}{g_{k+1}-g_k},\ g_k \le g \le g_{k+1},\ 1 \le k < K, \\ \sigma_2(g) &= (\sigma_2)_l^k \frac{g_{k+1}-g}{g_{k+1}-g_k} + (\sigma_2)_l^{k+1} \frac{g-g_k}{g_{k+1}-g_k},\ g_k \le g \le g_{k+1},\ 1 \le k < K, \end{aligned} \tag{3}$$

где: J – множество всех радионуклидов; I – множество всех каналов жидкостного сцинтилляционного спектрометра; L – множество всех энергетических линий *j*-го радионуклида; j – номер радионуклида; i – номер канала жидкостного сцинтилляционного спектрометра; l – номер энергетической линии *j*-го радионуклида; k – номер уровня гашения; g_k – уровень гашения; $S^{k,l}$ – площадь пика, [имп.]; $\xi^{k,l}$ – абсцисса центра пика; $\sigma_1^{k,l}$, $\sigma_2^{k,l}$ – параметры, определяющие форму пика; B^k – модельный спектр для спектра ОРР R^k для гашения g_k, $k \in K$.

Функция изменения эффективности измерения в зависимости от гашения библиотечного спектра j для k-го уровня гашения имеет вид:

$$E^k = \frac{1}{A_{OPP}^k} \frac{1}{t_k} \sum_{l=1}^{L} S^{k,l}, \tag{4}$$

где: t_k – время набора спектра для k-го уровня гашения, [с]; S^k – площадь спектра ОРР для k-го уровня гашения, [имп.]; $A^k{}_{OPP}$ – активность ОРР, введенная в пробу k-го уровня гашения, [Бк].

Аппроксимация функции эффективности измерения от уровня гашения в виде экспоненциальной функции:

$$E(g) = a \cdot e^{\left[b(g-512)+c(g-512)^2\right]}. \tag{5}$$

При измерении пробы: 1) получаем спектр $P \equiv P_i$, $i \in I$, где i – номер канала анализатора; 2) автоматически измеряется гашение g = const.

Из измеренного спектра P необходимо вычесть предварительно измеренный спектр фона $F \equiv F_i$, $i \in I$.

Имея модельные спектры *j*-го радионуклида $M_{i,j}(g)$, $i \in I$, $j \in J$, и минимизируя функционал (6), получаем коэффициенты θ_j, $j \in J$ вклада *j*-го радионуклида в спектр P'.

$$F = \sum_{i=1}^{I}\left(P_i' - \sum_{j=1}^{J} \theta_j M_{i,j}(g) \right)^2 \xrightarrow[\theta_j, j\in J, g=const]{} min\,. \tag{6}$$

Продифференцируем $\partial F / \partial \theta_j$. После дифференцирования получим в матричном виде:

$$B \times \theta = M. \tag{7}$$

Решение:

$$\theta = B^{-1} \times M. \tag{8}$$

Активность *j*-го радионуклида вычисляется по формуле:

$$A_j = \frac{1}{E_j(g)} \frac{\theta_j}{t} \sum_{i=1}^{I} M_{i,j}(g)\,, \tag{9}$$

где: A_j – активность *j*-го радионуклида в пробе, Бк; t – время набора спектра пробы, [с]; θ_j – вклад *j*-го радионуклида в спектр P'; $E_j(g)$ – библиотечная эффективность измерения *j*-го радионуклида в зависимости от гашения *g*; $M_{i,j}(g)$ – модельный спектр *j*-го радионуклида в *i*-м канале в зависимости от гашения *g*, [имп.].

Результаты и обсуждения

Неопределенность

Неопределенность модельного спектра. Вычислим неопределенность модельного спектра, используя [6]. Зафиксируем индексы: радионуклида – j = const, уровня гашения – k = const (далее индексы *j* и *k* будем опускать). Индекс *k* соответствует серии точек для различных гашений, которые получены непосредственными измерениями при построении библиотечного спектра *j*.

Входной величиной являются спектры ОРР (I – множество всех каналов жидкостного сцинтилляционного спектрометра):

$$X = \{P_1, \ldots, P_I\}. \tag{10}$$

Выходная величина в общем виде определяет модельные спектры $M_i(g)\big|_{g=g_k} \equiv B_i^k$ для соответствующих спектров ОРР (L – множество всех энергетических линий):

$$Y = \left\{ S^1, \xi^1, \sigma_1^1, \sigma_2^1, \ldots, S^L, \xi^L, \sigma_1^L, \sigma_2^L \right\}. \tag{11}$$

Неявный вид функциональной зависимости:

$$h(Y,X) = \begin{cases} \sum\limits_{i=1,1+L\cdot 4\cdot 1,\ldots,1+L\cdot 4\cdot n} (P_i - B_i)^2 = 0 \\ \sum\limits_{i=2,2+L\cdot 4\cdot 1,\ldots,2+L\cdot 4\cdot n} (P_i - B_i)^2 = 0 \\ \ldots \\ \sum\limits_{i=L\cdot 4, L\cdot 4+L\cdot 4\cdot 1,\ldots,L\cdot 4+L\cdot 4\cdot n} (P_i - B_i)^2 = 0 \end{cases}, \; 4\cdot L\cdot(n+1) \le I,\; i = 1,\ldots,I. \tag{12}$$

где: I – множество всех каналов жидкостного сцинтилляционного спектрометра; L – множество всех энергетических линий *j*-го радионуклида; i – номер канала жидкостного сцинтилляционного спектрометра; l – номер энергетической линии *j*-го радионуклида; S^l – площадь пика *l*-й энерге-

тической линии, [имп.]; ξ^l – абсцисса центра пика l-й энергетической линии; σ_1^l, σ_2^l – параметры, определяющие форму пика l-й энергетической линии; B_i – модельный спектр в i-м канале; P_i – спектр ООР в i-м канале, [имп.].

Входная величина: вектор заданного спектра ОРР для гашения k.

$$x = \left\{ \hat{P}_1, \ldots, \hat{P}_I \right\}. \tag{13}$$

Со стандартной неопределенностью:

$$u(x) = \left\{ u\left(\hat{P}_1\right), \ldots, u\left(\hat{P}_I\right) \right\}. \tag{14}$$

Решая уравнение (12) численным методом, получаем модельный спектр для ОРР для гашения k:

$$y = \left\{ \hat{S}^1, \hat{\xi}^1, \hat{\sigma}_1^1, \hat{\sigma}_2^1, \ldots, \hat{S}^L, \hat{\xi}^L, \hat{\sigma}_1^L, \hat{\sigma}_2^L \right\}. \tag{15}$$

Ковариационную матрицу U_y вычисляем по формуле (все производные вычисляются в точках $X = x$ и $Y = y$) [6]:

$$C_y U_y C_y^T = C_x U_x C_x^T, \tag{16}$$

где: C_y – матрица чувствительности размерности $4L \times 4L$, соответствующая выходной величине y; C_x – матрица чувствительности размерности $4L \times I$, соответствующая входной величине x; U_x – ковариационная матрица размерности $I \times I$, соответствующая входной величине x.

C_y – матрица чувствительности размерности $4L \times 4L$ имеет вид:

$$C_y = \begin{bmatrix} \partial h_1 / \partial S^1 & \ldots & \partial h_1 / \partial \sigma_2^L \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \partial h_{L\cdot 4} / \partial S^1 & \ldots & \partial h_{L\cdot 4} / \partial \sigma_2^L \end{bmatrix}. \tag{17}$$

C_x – матрица чувствительности размерности $4L \times I$ имеет вид:

$$C_x = \begin{bmatrix} \partial h_1 / \partial P_1 & \ldots & \partial h_1 / \partial P_I \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \partial h_{L\cdot 4} / \partial P_1 & \ldots & \partial h_{L\cdot 4} / \partial P_I \end{bmatrix}. \tag{18}$$

После дифференцирования матрица чувствительности C_x будет иметь вид:

$$C_x = \begin{bmatrix} 2P_1 - 2B_1 & 0 & 0 & 0 & 2P_{L\cdot 4+1} - 2B_{L\cdot 4+1} & \ldots \\ 0 & 2P_2 - 2B_2 & 0 & 0 & 0 & \ldots \\ 0 & 0 & 2P_3 - 2B_3 & 0 & 0 & \ldots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \ldots \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ 0 & 0 & \ldots & 2P_{L\cdot 4} - 2B_{L\cdot 4} & 0 & \ldots \end{bmatrix}. \tag{19}$$

U_x – ковариационная матрица размерности $I \times I$, соответствующая x, имеет вид:

$$U_x = \begin{bmatrix} r(P_1, P_1) u(P_1) u(P_1) & \ldots & r(P_1, P_I) u(P_I) u(P_I) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r(P_I, P_1) u(P_I) u(P_I) & \ldots & r(P_I, P_I) u(P_I) u(P_I) \end{bmatrix}, \tag{20}$$

где: $u(x)$ – стандартная неопределенность; $r(P_i, P_j)$ – корреляция между P_i и P_j.

Из принципа построения жидкостного сцинтилляционного спектрометра значения, набранные в одном канале, не влияют на соседние каналы. Это является следствием того, что один сигнал не может быть зарегистрирован в двух разных каналах, следовательно $r(P_i, P_j) = 0, i \neq j$. По определению $r(P_i, P_i) \equiv 1$. Ковариационная матрица (20) будет иметь вид:

$$U_x = \begin{bmatrix} u^2(P_1) & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & u^2(P_l) \end{bmatrix}. \tag{21}$$

Ковариационную матрицу U_y вычисляем согласно (16) (все производные вычисляются в точках $X = x$ и $Y = y$):

$$U_y = CU_xC^T.$$
$$C = C_y^{-1}C_x. \tag{22}$$

Для вычисления ковариационной матрицы U_y можно использовать численные методы или воспользоваться вычислительно-устойчивым алгоритмом [6].

После вычисления матрицы U_y получаем:

$$u\left(\hat{S}^1, \hat{\xi}^1, \hat{\sigma}_1^1, \hat{\sigma}_2^1, \ldots, \hat{S}^L, \hat{\xi}^L, \hat{\sigma}_1^L, \hat{\sigma}_2^L\right) \equiv \left(\sqrt{U_{y\,1,1}}, \sqrt{U_{y\,2,2}}, \ldots, \sqrt{U_{y\,L\cdot4,L\cdot4}}\right). \tag{23}$$

Следовательно, из (1) с учетом $M_i(g)\big|_{g=g_k} \equiv B_i^k$:

$$u(B_i) = \sqrt{\left(\frac{\partial\sum_{l=1}^{L} f^l(i)}{\partial S^1}\right)^2 u^2\left(\hat{S}^1\right) + \left(\frac{\partial\sum_{l=1}^{L} f^l(i)}{\partial \xi^1}\right)^2 u^2\left(\hat{\xi}^1\right) + \ldots + \left(\frac{\partial\sum_{l=1}^{L} f^l(i)}{\partial \sigma_2^L}\right)^2 u^2\left(\hat{\sigma}_2^L\right)}, \tag{24}$$

где

$$f^l(i) = \begin{cases} \dfrac{\hat{S}^l\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}\left(\hat{\sigma}_1^l + \hat{\sigma}_2^l\right)} e^{\frac{-\left(i-\hat{\xi}^l\right)^2}{2\left(\hat{\sigma}_1^l\right)^2}}, & i \le \hat{\xi}^l \\ \qquad\qquad , & l \in L. \\ \dfrac{\hat{S}^l\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}\left(\hat{\sigma}_1^l + \hat{\sigma}_2^l\right)} e^{\frac{-\left(i-\hat{\xi}^l\right)^2}{2\left(\hat{\sigma}_2^l\right)^2}}, & i > \hat{\xi}^l \end{cases} \tag{25}$$

Вычисление стандартной неопределенности для произвольной точки библиотечного спектра при использовании аппроксимации в виде непрерывной кусочно-линейной функции

Вычисленная неопределенность модельного спектра для i-го канала $u(B_i)$ на самом деле есть $u\left(B_i^k\right)$ для индекса гашения k (j и k были зафиксированы в начале параграфа), и реально мы получаем множество $\left\{u\left(B_i^k\right)\right\}, k \in K$, что соответствует значению гашения $\{g_k\}, k \in K$. Значение гашения g при измерении реального (не библиотечного спектра) не обязательно совпадет со значением гашения, взятого для построения библиотечного спектра. Поэтому необходимо использовать аппроксимацию стандартной неопределенности $u\left(M_i(g)\right)$. Вид аппроксимации $u\left(M_i(g)\right)$ зависит от вида аппроксимации функции изменения модельного спектра от уровня гашения. Если используется аппроксимация в виде непрерывных кусочно-линейных функций и, учитывая, что следствием $M_i(g)\big|_{g=g_k} \equiv B_i^k$ является $u\left(M_i(g)\right)\big|_{g=g_k} \equiv u\left(B_i^k\right)$, можно записать:

$$u\left(M_i(g)\right)=u\left(M_i^m\right)\frac{g_{m+1}-g}{g_{m+1}-g_m}+u\left(M_i^{m+1}\right)\frac{g-g_m}{g_{m+1}-g_m},\ g_m\le g\le g_{m+1},\ 1\le m<K\ . \quad (26)$$

Аналогичные вычисления проводятся для всех библиотечных изотопов $j \in J$.

Неопределенность функции эффективности измерения

Стандартная неопределенность эффективности измерения в точках, которые получены непосредственными измерениями при построении библиотечного спектра j из (4):

$$u\left(E^k\right)=\sqrt{\left(\frac{\partial E^k}{\partial A_{OPP}^k}\right)^2 u^2\left(A_{OPP}^k\right)+\left(\frac{\partial E^k}{\partial t_k}\right)^2 u^2\left(t_k\right)+\sum_{l=1}^{L}\left[\left(\frac{\partial E^k}{\partial S^{k,l}}\right)^2 u^2\left(S^{k,l}\right)\right]}. \quad (27)$$

То же, после дифференцирования:

$$u\left(E^k\right)=\sqrt{\left(\frac{1}{\left(A_{OPP}^k\right)^2 t_k}\sum_{l=1}^{L}S^{k,l}\right)^2 u^2\left(A_{OPP}^k\right)+\left(\frac{1}{A_{OPP}^k t_k^2}\sum_{l=1}^{L}S^{k,l}\right)^2 u^2\left(t_k\right)+\sum_{l=1}^{L}\left[\left(\frac{1}{A_{OPP}^k t_k}\right)^2 u^2\left(S^{k,l}\right)\right]}, \quad (28)$$

где: k – индекс, соответствующий серии точек, которые получены непосредственными измерениями при построении библиотечного спектра j (опущен индекс радионуклида j), $k \in K$; $u(t_k)$ – стандартная неопределенность времени набора спектра для k-го уровня гашения (из паспорта Quantulus-1220), [с]; $S^{k,l}$ – стандартная неопределенность площади спектра *OPP* для k-го уровня гашения (из паспорта Quantulus-1220), [имп.]; A_{OPP}^k – стандартная неопределенность активности ОРР, введенная в пробу k-го уровня гашения, [Бк].

Аппроксимация функции изменения эффективности измерения от уровня гашения представлена в виде экспоненциальной функции (5). Для вычисления неопределенности эффективности измерения для произвольного уровня гашения g необходимо вычислить стандартную неопределенность параметров экспоненциальной функции (a, b, c) из (5).

Входной величиной являются эффективности измерения в точках, которые получены непосредственными измерениями при построении библиотечного спектра j (K – множество всех точек):

$$X = \{E^1, \dots, E^k\}. \quad (29)$$

Выходной величиной являются параметры экспоненциальной функции (a, b, c) из (5):

$$Y = \{a, b, c\}. \quad (30)$$

Неявный вид функциональной зависимости:

$$h(Y,X)=\begin{cases}\sum\limits_{k=1,4,\dots}\left(E^k-E(g)\big|_{g=g_k}\right)^2=0\\ \sum\limits_{k=2,5,\dots}\left(E^k-E(g)\big|_{g=g_k}\right)^2=0,\quad k\in K,\\ \sum\limits_{k=3,6,\dots}\left(E^k-E(g)\big|_{g=g_k}\right)^2=0\end{cases} \quad (31)$$

где: K – множество всех точек, которые получены непосредственными измерениями при построении библиотечного спектра j; k – индекс точки $k \in K$; $E(g)$ – аппроксимация функции изменения эффективности измерения от уровня гашения (5); g_k – измеренный уровень гашения для точки k при построении библиотечного спектра j.

Входная величина: измеренные эффективности при построении библиотечного спектра *j*.

$$x = \left\{ \widehat{E^1}, \ldots, \widehat{E^K} \right\}. \tag{32}$$

Со стандартной неопределенностью:

$$u(x) = \left\{ u\left(\widehat{E^1}\right), \ldots, u\left(\widehat{E^K}\right) \right\}. \tag{33}$$

Значения стандартной неопределенности для (33) получены в (28).

Решая уравнение (31) численным методом, получаем параметры конкретной экспоненциальной функции (a,b,c):

$$y = \left\{ \hat{a}, \hat{b}, \hat{c} \right\}. \tag{34}$$

Ковариационную матрицу U_y вычисляем по формуле (все производные вычисляются в точках $X = x$ и $Y = y$) [6]:

$$C_y U_y C_y^T = C_x U_x C_x^T, \tag{35}$$

где: C_y – матрица чувствительности размерности 3×3, соответствующая выходной величине y;
C_x – матрица чувствительности размерности $3 \times K$, соответствующая входной величине x;
U_x – ковариационная матрица размерности $K \times K$, соответствующая входной величине x.

C_y – матрица чувствительности размерности $K \times K$ имеет вид:

$$C_y = \begin{bmatrix} \partial h_1/\partial a & \partial h_1/\partial b & \partial h_1/\partial c \\ \partial h_2/\partial a & \partial h_2/\partial b & \partial h_2/\partial c \\ \partial h_3/\partial a & \partial h_3/\partial b & \partial h_3/\partial c \end{bmatrix}. \tag{36}$$

C_x – матрица чувствительности размерности $3 \times K$ имеет вид:

$$C_x = \begin{bmatrix} \partial h_1/\partial E^1 \ldots & \partial h_1/\partial E^K \\ \partial h_2/\partial E^1 \ldots & \partial h_2/\partial E^K \\ \partial h_3/\partial E^1 \ldots & \partial h_3/\partial E^K \end{bmatrix}. \tag{37}$$

После дифференцирования матрица чувствительности C_x будет иметь вид:

$$C_x = \begin{bmatrix} 2\widehat{E^1} - 2t(g) & 0 & 0 & 2\widehat{E^4} - 2t(g) & 0 & 0 & \ldots \\ 0 & 2\widehat{E^2} - 2t(g) & 0 & 0 & 2\widehat{E^5} - 2t(g) & 0 & \ldots \\ 0 & 0 & 2\widehat{E^3} - 2t(g) & 0 & 0 & 2\widehat{E^6} - 2t(g) & \ldots \end{bmatrix}, \tag{38}$$

где:

$$t(g) \equiv \hat{a} \cdot e^{\left[\hat{b}(g-512)+\hat{c}(g-512)^2\right]}. \tag{39}$$

U_x – ковариационная матрица размерности $K \times K$, соответствующая x, имеет вид:

$$U_x = \begin{bmatrix} r\left(E^1, E^1\right)u\left(E^1\right)u\left(E^1\right) & \ldots & r\left(E^1, E^K\right)u\left(E^1\right)u\left(E^K\right) \\ \ldots & \ddots & \ldots \\ r\left(E^K, E^1\right)u\left(E^K\right)u\left(E^1\right) & \ldots & r\left(E^K, E^K\right)u\left(E^K\right)u\left(E^K\right) \end{bmatrix}, \tag{40}$$

где: $u(x)$ – стандартная неопределенность; $r(E^i, E^j)$ – корреляция между E^i и E^j.

Неопределенность измерения эффективности не коррелирует попарно для различных уровней гашения $r(P_i, P_j) = 0$, $i \neq j$. По определению $r(E^i, E^i) \equiv 1$. Ковариационная матрица (40) будет иметь вид:

$$U_x = \begin{bmatrix} u^2\left(E^1\right) & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & u^2\left(E^K\right) \end{bmatrix}. \quad (41)$$

Из формулы (35) ковариационную матрицу U_y вычисляем по формуле (все производные вычисляются в точках $X = x$ и $Y = y$):

$$\begin{aligned} U_y &= C\,U_x\,C^T \\ C &= C_y^{-1}C_x \end{aligned}. \quad (42)$$

Для вычисления ковариационной матрицы U_y можно использовать численные методы или воспользоваться вычислительно устойчивым алгоритмом [6].

После вычисления матрицы U_y получаем:

$$u\left(\hat{a},\hat{b},\hat{c}\right) \equiv \left(\sqrt{U_{y\,1,1}}, \sqrt{U_{y\,2,2}}, \sqrt{U_{y\,3,3}}\right). \quad (43)$$

Следовательно, из (5):

$$u\left(E(g)\right) = \sqrt{\left(\frac{\partial E(g)}{\partial a}\right)^2 u^2\left(\hat{a}\right) + \left(\frac{\partial E(g)}{\partial b}\right)^2 u^2\left(\hat{b}\right) + \ldots + \left(\frac{\partial E(g)}{\partial c}\right)^2 u^2\left(\hat{c}\right)}. \quad (44)$$

Продифференцировав (44), получим:

$$u\left(E(g)\right) = t(g)\sqrt{u^2\left(\hat{a}\right) + \left(\hat{a}(g-512)\right)^2 u^2\left(\hat{b}\right) + \left(\hat{a}(g-512)^2\right)^2 u^2\left(\hat{c}\right)}, \quad (45)$$

где: $t(g) \equiv e^{\left[\hat{b}(g-512)+\hat{c}(g-512)^2\right]}$.

Аналогичные вычисления проводятся для всех библиотечных изотопов $j \in J$.

Неопределенность параметров θ_j

Ковариационная матрица из (8):

$$cov\left(\theta(g)\right) = \frac{\sum_{i=1}^{I}\left(P_i' - \sum_{j=1}^{J}\theta_j M_{i,j}(g)\right)^2}{1024 - J} \times B^{-1}. \quad (46)$$

Стандартная неопределенность параметров θ_j, $j \in J$ типа B:

$$u\left(\theta_j(g)\right) = \sqrt{cov\left(\theta(g)\right)_{j,j}}, j \in J. \quad (47)$$

Неопределенность измерения спектра

Стандартная неопределенность активности j-го радионуклида вычисляется из (9) по формуле:

$$u\left(A_j\right) = \sqrt{\left(\frac{\partial A_j}{\partial E_j}\right)^2 u^2\left(E_j\right) + \left(\frac{\partial A_j}{\partial t}\right)^2 u^2(t) + \left(\frac{\partial A_j}{\partial \theta_j}\right)^2 u^2\left(\theta_j\right) + \sum_{i=1}^{I}\left[\left(\frac{\partial A_j}{\partial M_{i,j}}\right)^2 u^2\left(M_{i,j}\right)\right]}. \quad (48)$$

То же, после дифференцирования:

$$u\left(A_j(g)\right)=\sqrt{\left(\frac{\theta_j(g)}{\left(E_j(g)\right)^2 t}\sum_{i=1}^{I}M_{i,j}(g)\right)^2 u^2\left(E_j(g)\right)+\left(\frac{\theta_j(g)}{E_j(g)t^2}\sum_{i=1}^{I}M_{i,j(g)}\right)^2 u^2(t)+\left(\frac{1}{E_{j(g)}t}\sum_{i=1}^{I}M_{i,j}(g)\right)^2 u^2\left(\theta_j(g)\right)+\sum_{i=1}^{I}\left[\left(\frac{\theta_j(g)}{E_j(g)t}\right)^2 u^2\left(M_{i,j}(g)\right)\right]} \quad (49)$$

Пример измерения пробы воды из озера Кызылташ с вычислением стандартной неопределенности методом, предложенным в данной статье, приведен на рис.2.

На рис.2 относительная стандартная неопределенность для ^{3}H – 8,4%, для ^{90}Sr+^{90}Y – 1,1%.

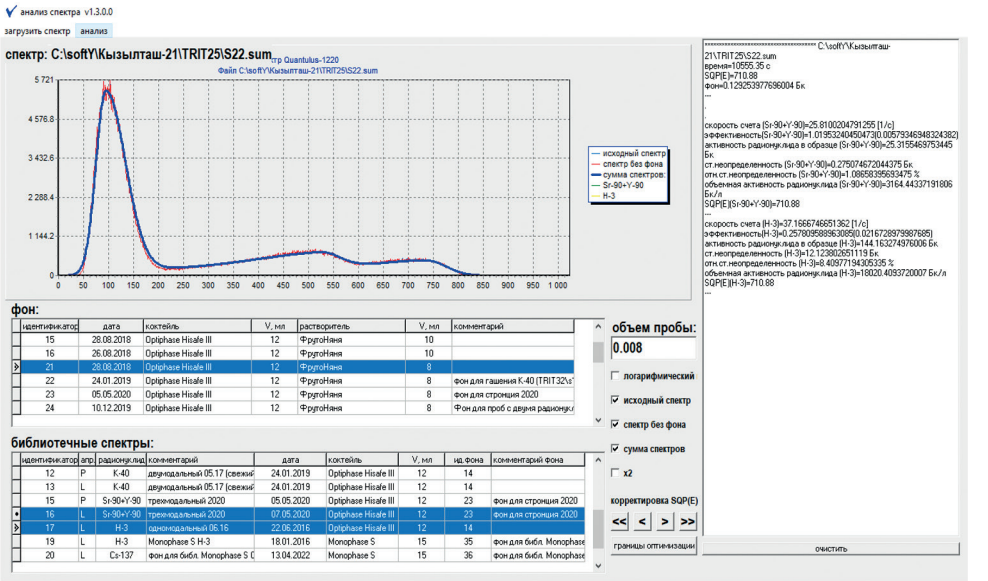


Рис.2. *Пример измерения пробы воды из озера Кызылташ с вычислением стандартной неопределенности.*

Заключение

В данной статье представлен способ вычисления стандартной неопределенности измерения объемной β-активности методом деконволюции β-спектра смеси радионуклидов на основе кусочно-комбинированных функций с кусочно-линейной аппроксимацией их параметров.

Рассмотрен пример применения метода измерения β-излучающих радионуклидов в пробах с описанным способом вычисления стандартной неопределенности при измерении пробы воды оз. Кызылташ (промышленный водоем В-2 ПО «Маяк»), содержащей ^{3}H и ^{90}Sr + ^{90}Y, после исключения примесей и взвесей на бумажном фильтре «Синяя лента». Относительная стандартная неопределенность для ^{3}H – 8,4%, для ^{90}Sr + ^{90}Y – 1,1%.

Согласно представленному методу идентификации β-излучающих радионуклидов в пробах с описанным способом вычисления стандартной неопределенности было создано программное обеспечение Aspect-SUBI.

Литература

1. **ГОСТ 34100.3.2-2017. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения.**
2. **Востротин В.В., Введенский В.Э. Разработка и верификация метода разложения β-спектра смеси радионуклидов на основе кусочно-комбинированных функций с полиномиальной или кусочно-линейной аппроксимацией их параметров//АНРИ. 2023. № 3(114). С. 26-44.**
3. **Введенский В.Э., Востротин В.В., Янов А.Ю., Финашов Л.В. Способ идентификации бета-излучающих радионуклидов в пробах с использованием жидкостного сцинтилляционного счетчика. Патент на изобретение RU 2746412.**
4. **L'Annunziata, F. Michael, *Handbook of radioactivity analysis*. Third edition. Imprint: Academic Press, 2012, 1379 p.**
5. **Джонсон Н.Л., Коц С., Балакришнан Н. Одномерные непрерывные распределения. В 2 ч., пер. 2-го англ. изд. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. Ч.1. 703 с.**
6. **ГОСТ 34100.3.2-2017. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. Дополнение 2. Обобщение на случай произвольного числа выходных величин.**

Standard Uncertainty of Measurement of Volumetric β-activity by the Method of Deconvolution of the β-spectrum of a Mixture of Radionuclides Based on Piecewise Combined Functions with Piecewise Linear Approximation of their Parameters

Vvedensky Vladimir (South Ural Institute of Biophysics, Chelyabinsk region, Ozersk, Russia)

Abstract. **A method is presented for calculating the standard uncertainty of measuring volumetric β activity by deconvolution of the β-spectrum of a mixture of radionuclides based on piecewise combined functions with piecewise linear approximation of their parameters. The method with the described method for calculating the standard uncertainty is intended for the determination of β-emitting radionuclides in environmental samples, in biosubstrate samples, in technological samples using a liquid scintillation counter with automatic determination of the spectral attenuation parameter of the external standard SQP(E). The method relates to the field of radioecological monitoring, environmental protection, and individual radiation monitoring of workers. The method for interpreting the β-spectrum was issued a patent of the Russian Federation RU 2019139690 dated 12.04.2019. According to the presented method for identifying β-emitting radionuclides in samples with the described method for calculating the standard uncertainty, the Aspect-SUBI software was created.**

Keywords: *standard uncertainty, liquid scintillation counter, Aspect-SUBI software, spectrum, library of model spectra, radioecological monitoring, environmental protection.*

В.Э.Введенский (вед. прогр.) – Южно-Уральский Институт Биофизики, Челябинская область, г. Озерск

Контакты: тел. +7 (351) 302-94-59; vvedensky@subi.su

DOI: 10.37414/2075-1338-2024-119-4-70-89 УДК 614.876:546.296

Кризис регулирования радона в России: дискуссия с регулятором по актуальным вопросам. Часть 1

В первой части статьи продолжается дискуссия с ответственным регулятором по таким актуальным вопросам регулирования радона, как (i) проблема проведения мероприятий по защите зданий от радона, (ii) проблема измерений радона и оценки соответствия, (iii) проблема информирования населения и ответственности за контроль радона, а также (iv) проблема разработки национального плана действий по радону. Вторая часть статьи предполагается к выходу в следующем номере журнала и будет посвящена подробному обсуждению документа МР 2.6.1.0333-23 в части контроля радона в зданиях в сопоставлении с альтернативным методом рационального контроля.

Ключевые слова:
радон, здания, риск, регулирование, норматив, измерения, оценка соответствия, защита от радона, информирование населения, национальный план действий, федеральная целевая программа.

А.А.Цапалов[1], П.С.Микляев[2], Т.Б.Петрова[3], С.И.Кувшинников[4]

[1] Научно-производственное предприятие «ДОЗА», г. Москва, г. Зеленоград
[2] Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, г. Москва
[3] Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», г. Москва
[4] Федеральный центр гигиены и эпидемиологии, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, г. Москва

После представленного развернутого критического анализа состояния регулирования радона в России [1] коллеги из ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева опубликовали опровержение мнения о существовании кризиса в регулировании радона [2]. Прежде чем перейти к обсуждению этого мнения, отметим, что, хотя регулятором радиационного риска является Роспотребнадзор, ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, как научно-исследовательский институт в этой системе надзора, подготавливает на всех уровнях регулирования (законодательном, нормативном и методическом) все ключевые решения,

касающиеся радоновой проблемы, поэтому мы продолжим называть наших оппонентов «регулятором», тем более, что это не вызвало возражений в [2].

Перед тем как продолжить дискуссию, хочется поблагодарить авторов [2] за ответ, уточнение текущей ситуации переработки нормативной базы, а также справедливую критику в наш адрес по части точности названий международных организаций. В то же время, с сожалением вынуждены отметить, что в [2] большая часть наших предложений по усовершенствованию регулирования радона не рассматривается по существу, все они отвергаются по формальным причинам. Проблема отсутствия реально действующих механизмов обеспечения радиационной безопасности населения от облучения радоном продолжает игнорироваться. В первом же абзаце ответной статьи оппоненты сообщают, что хотят дать «научную оценку» отдельным тезисам нашего анализа. Однако мы не нашли, к сожалению, в ответной статье именно научной оценки выдвинутых нами тезисов. Зато в опубликованном ответе упорно не замечаются важные факты, игнорируются, либо лишь поверхностно оцениваются, актуальные тезисы из [1], не полностью цитируется источник, чтобы показать якобы отсутствие логики у оппонента. Эти обстоятельства мы предлагаем рассмотреть в контексте конкретных примеров, представленных ниже.

Регулятор апеллирует к науке, однако, как в его «опровержении» кризиса регулирования [2], так и в методических документах НИИРГ [3,4,5], касающихся контроля радона, к сожалению, почти не содержится рациональных предложений или подходов, имеющих научное обоснование. В то же время за последние десятилетия в России и за ее пределами были проведены важные для усовершенствования регулирования научные исследования, в том числе при нашем участии. В этой связи при обсуждении соображений авторов [2] мы опираемся на опубликованные результаты этих исследований, систематизируя их по следующим наиболее актуальным вопросам регулирования радона:

- проблема проведения мероприятий по защите зданий от радона;
- проблема измерений радона и оценки соответствия;
- проблема информирования населения и ответственности за контроль радона;
- проблема разработки национального плана действий по радону.

Проблема проведения мероприятий по защите зданий от радона

Наши оппоненты обосновывают отсутствие каких-либо проблем, связанных с проведением мероприятий по защите зданий от радона (МЗР), ссылаясь на существование комплекта нормативно-методических документов, предусматривающих МЗР, а также организацию тендеров для их проведения [2]. Однако статистики по тендерам они в своем анализе не приводят, видимо, за ее отсутствием. Действительно, мы провели поиск по всем доступным тендерным площадкам за период с 2017 г. по настоящее время. Был найден всего лишь один (!) тендер на МЗР (в г. Вел. Новгород), поэтому можно с уверенностью сказать, что тендеры на МЗР в стране практически не проводятся. Также коллеги сообщают, что «…за последние 20 лет нами было осуществлено непосредственное экспертное и измерительное сопровождение таких работ на нескольких объектах в Санкт-Петербурге и Ленинградской области». Хотя оппоненты и опубликовали некоторую информацию о МЗР в двух зданиях [6,7], обе эти статьи, к которым мы вернемся ниже, почему-то не упоминаются в анализе [2]. Было бы интересно увидеть более детальную информацию о проведении МЗР как на этих двух, так и на других

объектах, включая особенности реализации и, главное, результаты независимого контроля эффективности проведенных МЗР с применением надежного метода тестирования.

Обратим внимание на тот факт, что, согласно [8], большая часть Ленинградской области, включая г. Санкт-Петербург, расположена в радоноопасной зоне. Вблизи южных берегов Финского залива и Ладожского озера, включая весьма населенные районы южной части и пригорода Санкт-Петербурга, простирается вытянутая с запада на восток зона с наиболее высокой радоноопасностью, связанная с близким залеганием к поверхности диктионемовых сланцев, богатых радием-226 [7], длина которой около 300 км при ширине 10–40 км. В этой связи кажется странным, что за 20 лет коллеги из НИИРГ, находясь почти в эпицентре радоноопасной зоны, приняли участие в проведении МЗР всего лишь на нескольких объектах.

Кстати, не менее озадачивающей выглядит доля населения Санкт-Петербурга, проживающего в зданиях с повышенным содержанием радона, которая вопреки логике оказывается почти в 3 раза ниже [1], чем в Москве, несмотря на низкую радоноопасность территории в столице и области [9]. Напомним, что данные в [1] были получены путем обработки информации, которую опубликовал сам же регулятор в открытых источниках [9]. Указанное противоречие подтверждает наш тезис о необходимости тщательной проверки представительности данных в ФБДОПИ [2], что более детально было обосновано в критическом анализе [1]. Однако вместо развития научной дискуссии регулятор выражает недовольство тем, что «авторы позволяют себе достаточно пренебрежительные отзывы о данных, собранных в ФБДОПИ», предлагая в будущем «основывать свои выкладки исключительно на собственных данных сопоставимого объема» [2].

Не хочется повторяться, но мы вынуждены снова напомнить о нашем относительно недавнем опыте обследования зданий в г. Лермонтове (с 2016 по 2018 гг.), показавшем, что ранее проведенные МЗР оказались не эффективны в 100% повторно обследованных зданий [1]. Это наблюдение не противоречит смыслу цитируемого нами фрагмента из доклада Межрегионального управления № 101 ФМБА России за 2017 г., где как раз подтверждается, что противорадоновые мероприятия, проведенные в 9 зданиях (детских учрежденях), позволили снизить содержание радона до нормируемых показателей только лишь в отдельных помещениях только одной из школ. Пример города Лермонтова, а также опыт исследовательской работы в радоноопасных регионах страны позволяет нам утверждать, что в большинстве случаев МЗР оказываются неэффективными (бесполезными) при их независимой проверке с помощью надежного метода тестирования. Ведь внедренная регулятором в практику методология экспрессного тестирования (в течение нескольких минут или часов), не учитывающая ключевую компоненту неопределенности из-за временных вариаций концентрации радона в помещениях, не только не обеспечивает надежность оценки соответствия (обычно не менее 95%), но и совершенно не защищена от небрежности либо умышленного нарушения условий измерения [10], что критически влияет на результат [1]. К сожалению, регламент проведения измерений, установленный регулятором [3,4], позволяет получать заранее предсказуемый результат измерения, не превышающий нормативный уровень даже в зданиях со сверхвысоким содержанием радона [1], однако эта проблема игнорируется многие годы. Более подробное обсуждение этого вопроса приводится в следующем разделе и, преимущественно, во второй части статьи.

Наше утверждение о неэффективном проведении МЗР может кому-то показаться

недостаточно обоснованным. Но если это и так, то только потому, что данные по реализации МЗР и контролю их эффективности почти отсутствуют в стране. Если обратиться к отечественной «Научной электронной библиотеке» (elibrary.ru), то окажется, что если на поисковый запрос «измерения ЭРОА радона» или «измерения плотности потока радона» система выдает 729 и 1417 документов, соответственно, то на запрос «радонозащитные мероприятия» или «противорадоновая защита» выдается чуть больше 50 работ, которые в основном представляют собой общие обзоры проблемы или международного опыта. Лишь одна работа посвящена описанию МЗР (без рисунков и схем) в существующем здании [6], но именно она уже упоминалась нами в [1] как пример проведения самим регулятором МЗР с сомнительной эффективностью, поскольку тестирование не было надежным. Была найдена еще одна, более поздняя работа, тоже принадлежащая регулятору [7], в которой сообщается о МЗР в другом здании, но описание самих работ не приводится. Там же сообщается о большом количестве измерений (более 1000) до и после проведения МЗР. Эти измерения проводились в разных помещениях (и в разных режимах: мгновенном, квазиинтегральном и интегральном), но результаты тестов и эффективность МЗР по отдельным помещениям не представлены. Вместо этого приводятся только усредненные данные в виде параметров логнормальных распределений, из которых следует, что ЭРОА радона снизилась в среднем по зданию примерно в 2 раза с 231 до 110 Бк/м^3, соответственно, средняя по зданию эффективность МЗР составила 52%. Наш анализ параметров логнормального распределения ЭРОА радона в [7] показывает, что более 30% измерений ЭРОА радона в разных помещениях (и режимах тестирования) после проведения МЗР все равно превышали нормативный уровень для существующих зданий, равный 200 Бк/м^3, который установлен в НРБ-99/2009. В этой связи важно обратить внимание, что эффективность МЗР должна оцениваться не по всему зданию в среднем, а по каждому проблемному помещению на основе результатов надежной оценки среднегодовых уровней, ориентируясь при этом на самое низкое значение эффективности МЗР среди тестируемых помещений. В дополнение к этому, если хотя бы в одном помещении с длительным пребыванием людей не удалось добиться среднегодового уровня радона ниже норматива, то МЗР должны признаваться не эффективными. Поэтому МЗР в [7], скорее всего, следует признать неэффективными. Однако в расчетном исследовании [11] регулятор пытается обосновать нецелесообразность дальнейшего снижения ЭРОА радона в примере [7] и доказать, что достигнутая эффективность МЗР (52% в среднем по зданию) вполне приемлема на основе теоретической оценки количества радон-индуцированных случаев смерти от рака легкого на популяционном уровне в долгосрочной перспективе. Вместо стремления развивать индустрию, МЗР, добиваясь максимального повышая эффективности, регулятор предпринимает дополнительные попытки «усовершенствовать» и без того неадекватную методологию тестирования [1] за счет контроля индивидуальной экспозиции в зданиях (включая детские учреждения) с некруглосуточным пребыванием людей [3,8], а не через управление зданиями, как это рекомендует МКРЗ [12].

Кроме того, из [6,7] можно понять, что примерно в 2000 г. регулятором была разработана адресная программа на выполнение МЗР в детских учреждениях (видимо, расположенных в Ленинградской области), но о проведенных МЗР в других зданиях, помимо двух упомянутых выше, в открытых источниках не сообщается. Возможно, это связано с тем, что тестирование и МЗР в одном детском учреж-

дении продолжались с 2001 по 2008 гг. [6], а в другом – с 2002 по 2012 гг. [7]. Если в рамках адресной программы тестирование и МЗР в одном здании заняли до 7 лет, а в другом до 10 лет, не приводя к заметному успеху, то начинает казаться понятной странность некоторых суждений и решений регулятора, скорее всего, давно убежденного в невозможности эффективного проведения МЗР, но вынужденного до сих пор это скрывать, публикуя обоснования типа [8,11].

По поводу эффективного проведения МЗР полезно напомнить о богатом международном опыте, который мы обсуждали в [1]. Важно вспомнить и уточнить, что в подавляющем большинстве случаев самым эффективным (около 90% в среднем [13]) и часто применяемым МЗР является установка активной системы создания депрессии (АСД) в грунте или подпольном пространстве, допускающая множество вариантов реализации в зависимости от конструкции заглубленной части здания [1]. Согласно данным того же исследования [13], эффективность пассивных методов защиты (герметизация стыков, щелей, монтаж изоляционных покрытий и т. п.) обычно низкая и не превышает 50%, что также подтверждается в опубликованных работах регулятора [6,7], который применял только пассивную систему МЗР. Вместе с тем, сочетание АСД с пассивными методами защиты увеличивает эффективность МЗР до 95–98% [13]. Другие варианты МЗР на основе активных систем типа принудительной вентиляции отдельных комнат или всего здания, требующие прокачки и кондиционирования огромных объемов воздуха, потребляют слишком много энергии по сравнению с АСД, поэтому принудительная вентиляция помещений оказывается экономически неэффективной и редко применяется (например, в США) для борьбы с радоном. Поскольку отсутствуют какие-либо сведения о практическом применении АСД в России, включая уникальное оборудование, данный факт дополнительно подтверждает, что среди единичных случаев проведения МЗР в существующих зданиях в подавляющем большинстве затраты финансов и времени оказываются неэффективными (бесполезными), не приводящими к заметному снижению содержания радона.

Другое утверждение регулятора о том, что «при возведении новых зданий на потенциально радоноопасных участках включение радонозащитных мероприятий стало рутинной работой, … не нуждающейся в научном сопровождении» также, к сожалению, абсолютно голословно. Мало того, в реальности проектирование противорадоновой защиты всегда было и остается не рутиной, а простой формальностью. Ведь все равно никакого контроля эффективности радонозащиты нормативными документами не предусмотрено, даже сам термин «эффективность МЗР» до сих пор не определен регулятором. Тем более, что радоновая проблема в любом здании преодолевается за счет применения давно внедренной регулятором методологии тестирования с неопределенной надежностью, о чем говорилось выше.

Учитывая вышеизложенное, наше утверждение о том, что в России МЗР не проводятся должным образом и, в частности, отсутствует не только сервис, но даже и минимальный опыт проведения МЗР [1], реально отражает кризисную ситуацию, давно сложившуюся в системе отечественного регулирования радона. Кстати, это утверждение разделяют и другие ведущие специалисты по радону, по крайней мере, все соавторы [10]. В такой ситуации организация тендеров на проведение МЗР выглядит довольно безответственно.

Необходимо уточнить, что мы не предлагаем научное сопровождение МЗР в каждом случае, как предполагают наши оппоненты [2]. Прежде всего, на первом этапе националь-

ного плана действий по радону [1] необходимо внедрение и наращивание богатого мирового опыта проведения МЗР в зданиях того же Лермонтова, Екатеринбурга (также можно включить южный пригород Санкт-Петербурга), а затем распространение такого опыта в масштабе страны. В этом случае рутинные МЗР следует рассматривать как реализацию опыта с применением надежных технологий и оборудования, не требующих научного сопровождения. Учитывая нетривиальность МЗР, например, связанную с применением технологий горизонтального бурения грунта и подземных ограждений здания, кажется очевидной необходимость системного (планового) наращивания и масштабирования отечественного опыта МЗР при поддержке государственных программ, против чего регулятор возражает, опираясь на весьма слабые доводы, которые обсуждались выше. Важно уточнить, что ответственность регулятора, действительно, не связана ни с разработкой, ни с осуществлением или финансированием МЗР. Однако регулятор обязан объективно оценивать эффективность и достижения создаваемой им системы регулирования радиационных рисков, в том числе из-за облучения населения радоном. МЗР в этой системе имеют решающее значение, поскольку радон создает наибольший радиационный риск по сравнению с любыми другими источниками ионизирующих излучений.

К сожалению, вместо развития научной дискуссии по ключевым вопросам [1], среди которых МЗР являются наиболее сложной в решении проблемой, регулятор поднимает совершенно не актуальный на данном (кризисном) этапе регулирования радона вопрос перехода от «гигиенического норматива» к «референтному уровню» [2]. Мы уже обращали внимание, что «значение и единицы измерения величины нормативного или референтного уровня не играют роли совершенно» [1], если МЗР не проводятся (должным образом) даже в условиях действия «гигиенического норматива».

Проблема измерений радона и оценки соответствия

В научных статьях обычно не принято обращаться лично и дискутировать только с одним из авторов, тем не менее наши оппоненты напрямую адресуют А.А. Цапалову целый ряд вопросов (или претензий) в отношении ранее разработанных устройств, таких как «КАМЕРА» (разработка 1998 г.), «Поиск» (разработка 2004 г.) и «АльфаАЭРО» (разработка 2008 г.). Некоторые из этих вопросов явно не по адресу, поскольку А.А. Цапалов уже давно не работает (и не сотрудничает) с теми компаниями, которые до сих пор выпускают эти средства измерений (СИ) радона.

Хотя обсуждаемые СИ были разработаны достаточно давно (15–25 лет назад), уже тогда каждое из них отвечало требованиям ISO/IEC по выражению результата измерений [14]. В этой связи апеллирование регулятора к требованиям ГОСТ 8.638 и ГОСТ 34100.3, которым якобы не соответствуют эти СИ [2], выглядит как проблема самого регулятора, который, судя по недавно введенным в действие МР 2.6.1.0333-23 [3], рассматривает оценивание неопределенности как формальную или типовую задачу, решаемую только подстановкой стандартных формул, при этом упуская из вида ключевые составляющие неопределенности. Вопрос метрологии в измерениях радона детально будет обсуждаться во второй части статьи.

Разработка указанных выше СИ проводилась с учетом существующих нормативов и методов измерений плотности потока (ППР), ЭРОА и ОА радона в воздухе (и в воде), включая конкретные требования и рекомендации регулятора по контролю того или иного параметра. Например, в России (в отличие

от остальных стран мира) регулятор до сих пор рекомендует проводить измерения ЭРОА (или ОА) радона в зданиях в экспрессном режиме (в течение нескольких минут или часов, как сообщалось выше) [3,4], хотя для оценки соответствия в качестве норматива используется среднегодовая величина. Это означает, что если продолжительность измерения меньше одного года, то недостаточно лишь измерить ОА или ЭРОА радона в воздухе с контролируемой точностью. Очевидно, необходимо дополнительно учитывать неопределенность временных вариаций радона, которая увеличивается с уменьшением продолжительности измерений [10]. Поэтому возникает вопрос – какова же количественно надежность оценки соответствия нормативу, выраженному в виде среднегодовой величины, при экспрессном, а также более длительных (в течение нескольких дней, недель и месяцев) измерениях, и можно ли уменьшить неопределенность (особенно в экспрессном режиме), чтобы повысить надежность решения о соответствии (или не соответствии) тестируемого помещения/здания требованиям норм безопасности?

Для ответа на этот весьма нетривиальный вопрос А.А. Цапалов решил примерно с 2002 г. постепенно переключиться с разработки СИ радона на исследование закономерностей его поведения во времени в помещениях зданий и геологической среде, также уделяя внимание решению вопросов строительной физики, касающихся защиты зданий от радона. С тех пор по этой тематике соавторы данной публикации при участии других специалистов опубликовали более сотни статей в отечественных и зарубежных научных журналах. Накопленные в течение нескольких десятилетий обширные экспериментальные данные и их комплексный (в том числе статистический) анализ [10,15] позволили гораздо лучше понять закономерности пространственно-временного поведения радона в зданиях и геологической среде, и затем на этой рациональной (научной) основе предложить усовершенствование методов контроля радона, да и самой системы регулирования радонового риска [1].

Наши конкретные предложения по усовершенствованию контроля ППР и надежной оценке потенциальной радоноопасности земельных участков [1] опираются на материалы нескольких десятков научных статей, положенных в основу монографии [15], а также разработанных при нашем участии МУ 2.6.1.038-2015 [16]. Тем не менее, регулятор в своей оценке [2] даже не замечает эти предложения. В то же время, ни в поддержку ранее действующих МУ 2.6.1.2398-08 [5], ни новых МР 2.6.1.0333-23 [3] по части контроля ППР регулятор до сих пор не опубликовал ни одной научной статьи.

Регулятор удивляется данной нами характеристике «неадекватная методология» в отношении МУ 2.6.1.2838-11 [4], ранее применявшихся для контроля радона в зданиях и недавно замененных на МР 2.6.1.0333-23 [3], в которых по-прежнему игнорируется вопрос надежности оценки соответствия. Причем эта проблема не просто критиковалась нами, а в [10] было предложено ее решение и представлен рациональный критерий оценки соответствия. Даже теперь, кроме эмоциональной реакции (удивления), регулятор в своей оценке [2] не приводит ни одного аргумента против нашей критики.

В этой связи нам представляется важным обсуждение, помимо научно-технических проблем регулирования радона, также вопросов научной этики. Ведь регулятор включает авторов критического анализа в состав «известных российских ученых» [2]. Тем не менее, вместо обсуждения проблем в обычном рабочем режиме, коллеги из НИИРГ даже не отвечают на письма, либо устраивают изнурительное рецензирование рукописей, представленных

в профильный журнал «Радиационная гигиена», тем самым навязывая свое мнение или вынуждая отзывать работы, в которых содержится критика существующего положения дел в регулировании.

Ярким, но не единственным примером нарушения регулятором правил научной этики являлось рецензирование неоднократно упоминаемой статьи [10], которая была подготовлена ведущими исследователями в области радона. В отличие от общепринятой практики рецензирования научных статей в один–два этапа, рецензирование этой статьи одним и тем же рецензентом на протяжении пяти (!) раундов выглядело как издевательство над авторами. Только после открытого обращения в редакционную коллегию и совет журнала «Радиационная гигиена» [17] наша статья была опубликована, но с критической задержкой на три месяца, лишь в самом конце 2023 г. В этой связи важно уточнить, что немного раньше (01.12.2023) была утверждена новая методика НИИРГ по контролю радона МР 2.6.1.0333-23 [3], в которой, однако, как и в предыдущих (МУ 2.6.1.2838-11 [4] и МУ 2.6.1.2398-08 [5]), не обеспечивается (и даже не обсуждается) надежность оценки соответствия. Создается впечатление, что регулятор намеренно затягивал публикацию статьи [10], чтобы можно было игнорировать предложенные авторами рациональные подходы тестирования зданий при подготовке МР 2.6.1.0333-23 [3]. Данный пример служит объяснением применения в нашем критическом анализе [1] выражений «неадекватная методология» и «саботаж». Поэтому очень важен глубокий анализ и обсуждение недостатков МР 2.6.1.0333-23 [3] по части контроля радона в зданиях, а также сопоставление этих МР с нашим проектом альтернативного метода оценки соответствия помещений и зданий требованиям норм радиационной безопасности по ограничению содержания радона в воздухе. Детальному обсуждению этих вопросов посвящена вторая часть статьи.

Продолжая обсуждение научно-технических вопросов, наши оппоненты демонстрируют определенное недовольство по поводу предложения и конкретных действий по внедрению IoT-технологий в регулирование радона в России, хотя ценность внедрения прогрессивных технологий во все сферы деятельности и жизнь людей совершенно не нуждается в оправдании. Критикуя сведения об опыте создания и внедрения в Израиле онлайн-системы «RadonTest» [18], регулятор пропустил важную информацию о том, что эта интернет-платформа способна обслуживать не только угольный метод (с известным детектором БДБ-13 и модернизированными пробоотборниками и WiFi-коммутатором), но и другие популярные методы измерений, например, интегральный метод на основе трекового детектора (SSNTD), электретный метод, а также бурно распространяющийся в мире метод непрерывных измерений (CRM) на основе преимущественно полупроводникового детектора или ионизационной камеры. На наш взгляд, становится очевидной необходимость разработки и внедрения в РФ отечественной платформы, аналогичной «RadonTest». Она могла бы обеспечить высокую надежность и одновременно существенно облегчить процедуру тестирования зданий для сотрудников аккредитованных лабораторий (использующих профессиональные СИ), а также открыть и легализовать возможность самим жильцам, владельцам зданий, риэлторам и любым другим заинтересованным лицам самостоятельно проводить надежное тестирование помещений зданий. Взаимодействие измерительной платформы с такими популярными торговыми сетями как «Wildberries», «OZON», «Яндекс Маркет» и т. п. позволило бы в массовом порядке распространять среди населения каждого региона РФ сравнительно недорогие

непрофессиональные СИ, а также угольные и трековые пробоотборники, которые после экспозиции доставлялись бы (через почтовые/курьерские службы) для анализа в лаборатории, подключенные к платформе.

Внедрение такой платформы также позволило бы гораздо эффективнее и в большем объеме собирать данные по сравнению с давно устаревшей системой полуручного сбора по форме № 4-ДОЗ [2]. Кроме того, через платформу можно контролировать соответствие разного типа СИ радона метрологическим требованиям, включая релевантность аттестации/поверки профессиональной аппаратуры, а также выявлять (и устранять) возможные тенденции снижения качества измерений с применением непрофессиональных СИ радона по каждому из конкретных типов.

Возможно, недовольство регулятора связано с опасением потери контроля, однако ему, как и другим заинтересованным сторонам, безусловно должен быть предоставлен доступ к исходным (не цензурированным) данным, аккумулируемым на платформе. Кроме того, очевидно, что развитие индустрии тестирования радона и МЗР (включая контроль других загрязнителей воздуха в зданиях) потребует наращивания усилий и со стороны самого регулятора (расширяя область его деятельности).

Регулятор пытается оспаривать [2] наш тезис о сложности и более высокой стоимости измерений ЭРОА по сравнению с ОА радона [1]. Однако он снова не приводит ни одного аргумента против хорошо ему известного обоснования сложности измерений ЭРОА [10]. Что касается более высокой стоимости измерений ЭРОА, то это обусловлено двумя факторами: (а) обычно более высокой стоимостью СИ ЭРОА из-за использования дополнительных устройств (воздуходувки, требующей также периодического обслуживания, датчика контроля расхода воздуха и более мощного аккумулятора) и расходных материалов (фильтров АФА-РСП), а также (б) измерения ЭРОА невозможно организовать в массовом режиме, в отличие от измерений ОА, когда сотруднику лаборатории не требуется посещение тестируемых помещений и зданий, поскольку измерения CRM-методом или пассивный отбор проб на угольные и трековые пробоотборники могут выполняться самим населением под управлением измерительной платформы [18].

Стоимость одного измерения ОА радона может быть до 30 раз ниже, чем стоимость одного измерения ЭРОА в зависимости от метода измерений ОА и массовости тестов с привлечением населения, что в принципе невозможно при измерениях ЭРОА. Например, в исследовании [19], сообщается, что при рациональной организации массового тестирования стоимость одного измерения ОА радона в течение 1–2 недель с помощью недорогих радон-мониторов (CRM-метод) может составлять 1–2 доллара (около 100–200 руб.), что существенно дешевле даже угольного метода. По нашим оценкам, если бы в России была налажена рациональная система массовых измерений радона на основе IoT-технологий, стоимость одного измерения ОА радона угольным и трековым (SSNTD) методами сейчас составляла бы (без почтовых или курьерских расходов) 400–500 руб. и около 1500 руб., соответственно. Ориентировочная стоимость недорогих (непрофессиональных) мониторов для непрерывных измерений ОА радона составляла бы около 20000 руб., причем их применение под управлением платформы в рамках рационального критерия оценки соответствия практически не снижает надежность тестирования по сравнению с применением профессиональных (более дорогих) СИ, о чем сообщается в выводах того же исследования [19].

К сожалению, в России не просто отсутствует измерительная платформа. В условиях

кризиса, который отказывается признавать регулятор, нет понимания перспектив развития индустрии регулирования радонового риска. Поэтому не возникает мотивации разрабатывать что-то новое, и на российском рынке уже давно не появляются новые и даже модернизированные СИ радона, при этом цены на ранее разработанные СИ только растут и уже варьируют в диапазоне от 200000 до 600000 руб. Хотя можно вспомнить одно исключение, когда примерно в 2016 г. компания «КВАРТА-РАД» (г. Москва) выпустила недорогой радон-монитор «RADEX MR107» стоимостью менее 10000 руб. (в ценах того времени). Однако, казалось бы, даже такой вполне доступный для населения монитор, конкурирующий по цене и качеству с зарубежными СИ, несколько лет назад перестал продаваться. Лишь совсем недавно он появился на «OZON», но уже с сертификатом соответствия. Кстати, в сертифицированной документации на этот монитор, по факту измеряющий ОА радона, приводится диапазон измерений в единицах ЭРОА и сообщается, что он предназначен для оценки ЭРОА радона и дочерних продуктов изотопов радона по ОА радона. Подобный хаос в терминологии усиливает необходимость перехода в нормировании от единиц ЭРОА к единицам ОА радона, однако и по этому вопросу регулятор не высказался определенно в [2].

Многие российские профильные приборостроительные компании вполне могли бы разработать и измерительную платформу, и недорогие СИ радона. Однако менеджеры предприятий понимают, что вложение ресурсов частной компании вряд ли оправдается и будет приносить прибыль, поскольку неинформированное население не рассматривается всерьез как потребитель продукции, а индустрия тестирования радона (не говоря о МЗР) уже десятилетие не развивается, а, наоборот, идет на спад. Как известно, спрос рождает предложение, а спрос на СИ того или иного типа формирует именно регулятор через внедрение определенных методов тестирования. Поэтому вопрос регулятора, а точнее, упрек в том, что НПП «Доза» могло бы само разрабатывать и выпускать недорогие СИ радона (вместо перепродажи дорогих) [2], следует адресовать самому регулятору, позиция которого приводит к созданию системы имитации регулирования радонового риска и не способствует развитию контроля радона в зданиях. В такой системе, существующей уже десятилетия, МЗР не проводятся (должным образом), а возникающие в этой связи проблемы «благополучно решаются» за счет применения неадекватной методики экспрессного тестирования зданий (что не применяется ни в одной стране мира, кроме России), позволяющей получать заранее предсказуемый результат измерения, не превышающий нормативный уровень даже в зданиях со сверхвысоким содержанием радона, о чем сообщалось в предыдущем разделе. Как раз для экспрессного (не обеспечивающего надежность) тестирования зданий больше всего подходят СИ ЭРОА радона, которые позволяют значительно быстрее (почти мгновенно – в течение нескольких минут) проводить измерение по сравнению даже с наиболее чувствительными СИ ОА радона, такими как, например, упоминаемый регулятором радон-монитор типа «RadonEye Plus2» [2]. Кроме того, СИ ОА радона не позволяют измерять ЭРОА торона (вопрос отмены нормирования ЭРОА торона будет рассмотрен детально во второй части статьи). По этим причинам аккредитованные лаборатории в основном и покупают СИ ЭРОА радона (более дорогие и неэффективные для массового тестирования зданий), руководствуясь принятой (неадекватной, на наш взгляд) методологией регулятора [3,4]. В то же время недорогие СИ ОА радона типа «RADEX MR107» или «RadonEye Plus2»

совершенно не годятся для экспрессных и, тем более, мгновенных измерений, но будут весьма востребованы при условии внедрения контроля радона в зданиях на основе рационального критерия оценки соответствия [10], особенно с помощью измерительной платформы.

Проблема информирования населения и ответственности за контроль радона

Проблема информирования населения о вреде радона воспринимается регулятором как весьма актуальная [2,20]. Тем не менее, в течение нескольких десятилетий для ее решения никаких значимых действий не предпринималось. Можно отметить разве что размещение на сайте НИИРГ в разделе «НОВОСТИ» заметки под названием «Радон: что о нем нужно знать» [21], которая появилась только в апреле 2024 г. после публикации нашей критической статьи [1]. Кстати, эта новость о радоне будет раньше или позже заменена более свежими новостями и перестанет отображаться на главной странице сайта, поэтому информацию о радоне лучше переместить в отдельный раздел на главной странице.

Регулятор может возразить, что в 2020 г. провел Всероссийское социологическое исследование по вопросу облучения радоном [20], о чем сообщает в [2]. Конечно, это лучше, чем ничего, но кажется очевидным, что сначала в рамках финансируемых мероприятий ФЦП «Ядерная и радиационная безопасность России» на 2000–2006 годы [22], начиная с 2000 г., было необходимо информировать население о вреде радона (что не сделано до сих пор) и только затем проводить социологическое исследование для улучшения следующих информационных кампаний. Заметим, что практически весь набор заключений регулятора на основе результатов данного социологического исследования совпал с нашими представлениями о решении проблемы информирования населения о радоновом риске. В этом и следующем разделах мы считаем важным процитировать некоторые выводы регулятора [20], сопроводив их вопросами и комментариями.

Цитата 1: «При этом необходимо подчеркивать, что измерение содержания радона в воздухе помещений является единственным достоверным способом выявить наличие или отсутствие данного фактора риска, и при этом проведение измерений не требует существенных финансовых и временных затрат». Хотелось бы уточнить: тестирование помещений зданий по-прежнему будет проводиться на основе «мгновенных» (или экспрессных) измерений, согласно вновь утвержденной методологии [3], по нашему мнению, не обеспечивающей надежность оценки соответствия? Повторим, что именно использование IoT-технологий и вовлечение населения благодаря внедрению рационального подхода в тестирование зданий [10] обеспечило бы действительную минимизацию финансовых и временных затрат, если речь идет о надежной оценке соответствия.

Цитата 2: «Респонденты в ходе опроса отмечали, что основным препятствием для осуществления защитных мероприятий является тот факт, что само принятие решения о проведении этих мероприятий зависит не только от них. Таким образом, здесь риск-коммуникации могут быть направлены не только на жильцов многоквартирных домов, но и на руководство управляющих компаний, товариществ собственников жилья с целью убедить их самих и жильцов обслуживаемых ими домов в целесообразности проведения измерений и, в случае необходимости, радонозащитных мероприятий». Это верно, что решение о проведении МЗР зависит не только от жителей. Реализуемость данного решения зависит и от способности регулятора реально оценивать сложившуюся ситуацию, а также от воли для

преодоления кризиса в регулировании радонового риска в стране.

Во-первых, в условиях отсутствия качественного сервиса и даже минимального опыта проведения МЗР, о чем сообщалось выше, желание кого бы то ни было заметно снизить как индивидуальный, так и коллективный радоновый риск пока невозможно реализовать.

Во-вторых, наличие опыта проведения МЗР означает возможность выбора наиболее эффективного в конкретных условиях варианта МЗР из множества ранее реализованных. Применение такого опыта может решить проблему локально, если соседи или кто-то еще не проявляют интереса. Если ответственно подходить к решению проблемы МЗР, вполне реально разработать недорогую и энергоэффективную систему, например, вентилируемого напольного покрытия (или только плинтусов) в пределах отдельной квартиры. Для этого необходимы испытания в проблемных зданиях разного типа (а не в лабораторных условиях) не только хорошо опробованных в других странах, но и оригинальных идей и подходов МЗР, разумеется, в рамках специальных государственных программ. Ведь ни лабораторные эксперименты, ни построение математических моделей, ни исследование свойств материалов и т. п. в данном случае не актуальны, поэтому невозможно рассчитывать даже на получение научно-исследовательских грантов в рамках конкурсов, проводимых, например, Российским научным фондом.

В-третьих, очень важно, чтобы инициаторами тестирования и МЗР в жилых зданиях были собственники жилья или риэлторы (готовые добровольно оплачивать эти услуги), а не сотрудники Роспотребнадзора (или других государственных или частных организаций), как предполагает регулятор. Важно понимать, что в России до сих пор не было (и скорее всего не будет) случаев выделения средств из административных бюджетов на проведение МЗР в жилищах. Даже в США, Великобритании, Швеции и других странах Европы такой благотворительностью не занимаются. В этих странах индустрия тестирования и МЗР уже давно хорошо развита именно потому, что достаточно информированное население самостоятельно заказывает и оплачивает эти услуги. Наш опыт в России показывает, что попытки бесплатного тестирования обычно не приветствуются, а нередко встречают недоверие и даже враждебность среди жильцов и работников, особенно среди руководителей детских учреждений, если нет письменного одобрения вышестоящего руководства. Поэтому пора прекратить ходить по квартирам и коттеджам, предлагая бесплатные тесты обитателям. Для решения проблемы необходимо четко сформулировать требования по распределению ответственности за финансирование и проведение контроля радона (и других наиболее вероятных и реально опасных загрязнителей воздуха) в зданиях, поскольку люди проводят в них суммарно 80–90% времени.

В-четвертых, степень мотивации добровольного тестирования и проведения МЗР (включая добровольную оплату) напрямую зависит от сочетания доступности этого сервиса и уровня информированности населения о радоновом риске, а также о мерах по его снижению. Кроме того, очень важен пример для населения со стороны исполнительной власти, заключающийся в организованном проведении во всех субъектах РФ обязательных тестов и МЗР в детских учреждениях (за счет местного или федерального бюджета), а также в зданиях или части зданий, которые используются в коммерческих целях (за счет арендодателя или собственника недвижимости).

Регулятор, критикуя наше предложение по классификации зданий и распределению ответственности за проведение контроля радона, к сожалению, не предлагает уточняющее или альтернативное решение по этому

вопросу, которое было бы понятно любому представителю власти и населения. Следует также понимать, что предложенный нами в [1] вариант классификации выражает лишь принцип, допускающий уточнение с более сложной структурой. Поэтому справедливый вопрос регулятора об ответственности контроля в таком распространенном случае, когда в жилых зданиях нижние один или два этажа являются нежилыми и используются в коммерческих целях, не кажется сильно озадачивающим. Представляется очевидным, что в этом случае арендодатель или собственник коммерческой недвижимости обязан провести тестирование, а также МЗР, если содержание радона будет превышать норматив.

Вопрос о возможных фальсификациях и правонарушениях при привлечении к измерениям населения, который поднимает регулятор, полностью теряет значение в случае добровольного финансирования и участия населения в проведении тестов и МЗР. Кроме того, независимая экспертиза результатов измерений при необходимости принятия решения о выделении бюджетных средств (например, в случае обязательного контроля радона в детских учреждениях) не вызывает проблем при условии надежного тестирования зданий. В то же время, фундаментальную проблему в решении обсуждаемого вопроса создает, во-первых, нежелание регулятора решать весьма нетривиальную задачу эффективного проведения МЗР. Во-вторых, внедренная именно регулятором методология экспрессного тестирования [3,4] не обеспечивает надежность (не менее 95%) оценки соответствия помещений зданий требованиям норм безопасности. Ведь в зависимости от погодных условий и многих других естественных и антропогенных факторов одно и то же помещение в разные моменты времени может соответствовать либо не соответствовать требованиям безопасности независимо от того, кто проводит измерение – сотрудник аккредитованной лаборатории или сам житель (эта проблема более подробно обсуждается во второй части статьи).

Любая сложная проблема в регулировании может быть решена, если ее существование признается всеми ответственными сторонами, включая регулятора, который к тому же должен быть способен эффективно взаимодействовать с другими специалистами для ее совместного решения.

Проблема разработки национального плана действий по радону

Свою научную оценку [2] регулятор начинает с информирования о том, что ему «прекрасно известны» предлагаемые и продвигаемые МАГАТЭ и МКРЗ принципы регулирования радонового риска, далее упрекая нас в настойчивом повторении словосочетания «МАГАТЭ требует». Однако параграфы документа МАГАТЭ [23], на которые мы ссылаемся, а один из них регулятор цитирует в своих выводах [20], выражены именно как требования, и всем понятно, что эти требования не являются строгими в нормах международного права.

Регулятор, обосновывая свою компетенцию в международном регулировании радона, начинает с сообщения об участии сотрудников НИИРГ с 2014 по 2022 гг. в трех региональных проектах технического сотрудничества МАГАТЭ по радоновой тематике: RER9127 [24], RER9136 [25] и RER9153 [26]. Здесь важно уточнить, что во всех этих проектах фокус обсуждения был сосредоточен на разработке, внедрении и оценке эффективности стратегий национальных планов действий по снижению облучения населения от радона в тех странах, которые представляли участники. Однако в России, в отличие от стран Европейского Союза, США, Канады и многих других стран, план действий по радону до сих пор не разработан на уровне государственной федеральной целевой программы (ФЦП),

включающей согласованный набор конкретных действий (и исполнителей) по заданным направлениям с определенным временным графиком. Хотя после ФЦП «Радон» [22], проводившейся в 1994–1996 гг., снова наблюдалось оживление работы в этом направлении в 2012–2014 гг., но, кроме нескольких отчетов [27,28], регулятор так и не опубликовал концептуальную статью с изложением плана с временным графиком и перечислением конкретных действий в изменившихся за 15–20 лет условиях. Вместо этого регулятор ограничился беглой оценкой направлений плана [29] и призывом «заставить работать» [30] систему регулирования радона, которые были дополнены перечислением проблем регулирования радона в работах [31,32], опубликованных в соавторстве со специалистами других институтов. И вот теперь свою научную оценку регулятор подытоживает призывом верить в то, что «Даже в отсутствие утвержденной на федеральном уровне национальной радоновой программы… в один, несомненно, прекрасный для нас всех день, паззл под названием «Национальная радоновая программа» сложится…» [2]. Однако после единственно разработанной ФЦП «Радон» этот «паззл» в течение почти 30 лет так и не сложился, наоборот, нарастает кризис регулирования радона, который не желает признавать регулятор.

Удивляет раздраженная реакция регулятора на нашу попытку [1] впервые оценить затраты на реализацию плана действий по радону в рамках текущей ФЦП «ЯРБ-2» [33]. Регулятор настаивает [2], что в рамках этой ФЦП невозможно, в принципе, финансирование мероприятий для «…обеспечения радиационной безопасности населения при воздействии ПИИИ в коммунальных условиях и быту», хотя в его же журнале «Радиационная гигиена» приводится информация, допускающая такую возможность, например, сообщается: «В последующий период работа по направлению природных источников ионизирующих излучений планировалась в рамках общих программ, направленных на обеспечение ядерной и радиационной безопасности России от всех источников ионизирующей радиации:

– ФЦП «Ядерная и радиационная безопасность России» на 2000–2006 гг.»,

– ФЦП «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года»,

– ФЦП «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 годы и на период до 2030 года» [22]. Кроме того, по данному вопросу регулятор случайно или намеренно приводит неполное цитирование [2], пропуская последнее ключевое предложение нашего тезиса, которое в источнике выглядит следующим образом [1]: «…руководство ФЦП ЯРБ, представляющее Госкорпорацию «Росатом»…не поддержало финансирование работ по обеспечению радиационной безопасности населения от воздействия радона. Однако по нашему мнению, такое решение было вполне ожидаемым, поскольку до сих пор отсутствует детализированный и согласованный национальный план действий по радону, позволяющий обосновать необходимый бюджет».

Далее по тексту [2] регулятор приводит пример выборочных радоновых обследований в регионах «…несмотря на отсутствие действующей национальной радоновой программы и государственного финансирования массовых исследований содержания радона в воздухе помещений…», пытаясь доказать, что «пазл» все-таки складывается. Однако указывая количество обследованных зданий за период с 2018 по 2023 гг., которых оказалось менее 500 среди 17 млн зданий в России, регулятор не сообщает о проведении МЗР ни в одном случае, хотя обследования проводились в основном в Ленинградской области, значительную часть которой охватывают зоны с повышенной и высокой радоноопасностью [8]. Мы снова задаем

простой вопрос – если МЗР не проводятся (должным образом), то какой смысл в продолжении тестирования зданий? Тем более, что уровни природного облучения населения уже давно изучены [30], и их незначительное (но даже и значительное) уточнение не содержит заметной пользы в защите населения от радона, кроме публикации красивых ежегодных отчетов, демонстрирующих якобы эффективно работающую систему регулирования радонового риска в России.

К сожалению, наблюдается весьма печальная тенденция снижения компетенции в части организации эффективной системы регулирования радонового риска. Еще в 90-е и в начале нулевых годов НИИРГ был признанным лидером по этой тематике, а профессор Э.М. Крисюк играл ключевую роль в научном обосновании и реализации ФЦП «Радон» в 1994–1996 гг., что позволило даже при скудном финансировании добиться существенных результатов [22]. Затем, в 2012–2014 гг., когда открывалась возможность полноценного включения радоновой темы в следующий этап ФЦП ЯРБ, регулятор, понимая важность и необходимость разработки национального плана действий по радону [27-32], не предусмотрел проведение соответствующих работ. Возможно, объяснением является проблема эффективного проведения МЗР, которая тогда казалась регулятору неразрешимой (см. соответствующий раздел выше). В итоге радоновая тема не была включена в ФЦП ЯРБ на 2016–2020 гг. и на период до 2030 г. И теперь регулятор настаивает на невозможности финансирования «радонозащитных мероприятий» [2] (видимо, и радоновой программы в целом) из средств ФЦП ЯРБ-2, потому что радоновой темы нет в задачах ФЦП, и это будет нецелевое расходование средств. Так кто же, как не регулятор, несет за это ответственность? В настоящее время (2024 г.) регулирование радона предлагается заменить верой в некий магический «пазл» и ждать, когда он сложится, не замечая кризис.

И все-таки в выводах относительно недавней публикации регулятора в 2021 г. [20], уже цитировавшейся в предыдущем разделе, сообщается, что «…нельзя исключать возможности появления национальной радоновой программы в будущем…». В финальной части этих же выводов регулятор сообщает: «Следует отметить, что участники рынка услуг, связанных с проведением измерений, а также с разработкой и осуществлением радонозащитных мероприятий, должны быть в этом случае готовы к потенциальному росту количества обращений от заинтересованных граждан и организаций. Это подчеркивает главную особенность разработки и реализации радоновых программ: они могут быть успешно воплощены только в случае тесного и скоординированного взаимодействия большого числа заинтересованных сторон…».

Соображения регулятора общего характера, выраженные в цитатах выше, мы просто дополнили, структурировали и предложили для предварительного обсуждения в виде девяти приоритетных мероприятий национального плана действий в условиях сложившегося кризиса [1,34]. В дополнение к этому регулятору было направлено письмо для обсуждения необходимости формирования межведомственной (радоновой) группы специалистов в области радона, разумеется, с его участием в радоновой группе, уже охватывающей около десяти конкретных организаций из разных ведомств. Ответ на наши предложения и это письмо мы увидели только в обсуждаемой статье [2]. К сожалению, регулятор не желает замечать наши конкретные предложения по развитию национального плана, а по поводу создания радоновой группы отвечает, что «…настойчивое «революционное предложение»…о создании рабочей группы для обсуждения вопросов нормирования (почему только нормирования? –

– авторы) радона несколько запоздало» [2]. Хотя из достаточно подробного объяснения регулятора по вопросу переработки нормативной базы РФ вовсе не следует, что наше предложение запоздало. Ведь переработка НРБ и ОСПОРБ лишь приостановлена и будет продолжена после завершения актуализации Федерального закона № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения» [2]. Кроме того, в официально созданной 06.04.2022 (основной) рабочей группе нет специалистов, обладающих достаточно глубокими знаниями в области радона. В этой связи мы считаем важным учитывать в работе основной группы согласованные предложения, которые могут поступать от радоновой группы через представителя регулятора или ФМБА России, который одновременно мог бы информировать радоновую группу о текущих решениях и намерениях основной группы.

Возвращаясь к вопросу снижения компетенции в регулировании радонового риска и бездействию регулятора в части разработки национального плана действий, кажется очевидной необходимость создания межведомственной радоновой группы по разработке такого плана. Если нет возможности интегрироваться в одно из направлений ФЦП ЯРБ-2, все равно чрезвычайно актуальна разработка современной концепции и национального плана действий, который может быть реализован в рамках отдельной ФЦП. Нежелание (или неспособность) регулятора заниматься разработкой национального плана действий по радону вовсе не отменяет его необходимость.

Коллеги, хватит верить в сказки про «пазл», который сам сложится, и призывать к вере других. Пора снова начинать работать коллективно, с учетом разных мнений, а не объяснять, какие еще юридические казусы и бюрократические формальности мешают, наконец, заняться решением проблемы обеспечения радиационной безопасности населения, в которой радон является ключевым фактором природно-техногенного риска.

Подводя итог, важно напомнить, что, например, в США, благодаря хорошо развитому сервису контроля радона и информированности населения, проведено более 100 млн тестов (в 100 раз больше, чем в России) и более 5 млн МЗР (которые в России не проводятся), что реально снижает риск от радона в США, причем это достигается без особых затрат из национального и местных бюджетов [10]. Население само финансирует индустрию регулирования радона, ежегодный оборот, который мы оцениваем порядка 1–3 млрд долларов (около 100–300 млрд руб.), а индустрии регулирования качества воздуха в зданиях (IAQ) в целом от 18 до 30 млрд долларов (около 2–3 трлн руб.), основываясь на данных американского Агентства по охране окружающей среды. В то же время, устаревшая и неэффективная система отечественного регулирования радона, когда население крайне слабо информировано, а контроль радона находится в состоянии стагнации, никак не способствует ни заметному снижению радонового риска и «повышению качества жизни населения России» (www.niirg.ru/Fields.htm), ни подъему индустрии тестирования и МЗР. Между тем, развитие индустрии регулирования радона (как и других загрязнителей воздуха в зданиях), сфокусированное на повышение качества жизни, также могло бы способствовать экономическому развитию России, увеличивая доход в бюджет государства, которому во всех отношениях выгодна поддержка национального плана действий на уровне ФЦП.

Вместо заключения

1. Хотелось бы призвать коллег к честной дискуссии с неизменным соблюдением норм научной этики, необходимой для преодоления кризиса и устойчивого развития регулирования радона в стране. Авторы полностью

согласны с позицией регулятора в том, что «критика полезна только в том случае, когда она конструктивна и основывается на фактах, а не на домыслах и абстрактных размышлениях». Именно такого стиля дискуссии мы неизменно придерживаемся и призываем придерживаться наших оппонентов.

2. Также хотелось бы получить от регулятора четкий ответ о необходимости разработки национального плана действий по радону на уровне федеральной целевой программы (или о том, что уже принято окончательное решение дожидаться, когда «пазл» сложится сам в условиях углубляющегося кризиса, т. е. фактически отказаться от регулирования радонового риска).

3. Кроме того, хотелось бы понять, намерен ли регулятор поддержать, в том числе своим участием, работу межведомственной радоновой группы, деятельность которой будет связана с преодолением кризиса путем разработки и внедрения национального плана действий? Если не намерен, то почему, и какие могут быть альтернативные решения?

Авторы выражают глубокую признательность за поддержку своей позиции и ценные замечания: к.ф-м.н. Губину А.Т. и к.ф-м.н. Герцену Г.П. (ФГУП НТЦ РХБГ ФМБА России), д.т.н. Жуковскому М.В. и к.ф-м.н. Ярмошенко И.В. (ИПЭ УрО РАН), к.м.н. Охрименко С.Е. (ФГБОУ ДПО РМАНПО Минздрава России), к.т.н. Антропову С.Ю. (ФГУЗ ЦМИИ ФГУП «ВНИИФТРИ»), аспиранту Гаврильеву С.Г. (МГУ им. М.В. Ломоносова).

Литература

1. **Цапалов А.А., Микляев П.С., Петрова Т.Б., Кувшинников С.И. Кризис регулирования радона в России: масштаб проблемы и предложения по исправлению//АНРИ. 2024. № 1(116). С. 3-29. DOI:10.37414/2075-1338-2024-116-1-3-29.**
2. **Романович И.К., Кормановская Т.А., Кононенко Д.В. К вопросу регулирования радона в Российской Федерации. Дискуссия по материалам публикации «Кризис регулирования радона в России: масштаб проблемы и предложения по исправлению»//Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 2. С. 128-137. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-2-128-137.**
3. **МР 2.6.1.0333-23. Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка жилых, общественных и производственных зданий и сооружений по показателям радиационной безопасности. Методические рекомендации Утверждены руководителем Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 01.12.2023.**
4. **МУ 2.6.1.2838-11. Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка жилых, общественных и производственных зданий и сооружений после окончания их строительства, капитального ремонта, реконструкции по показателям радиационной безопасности. Методические указания. Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 28.01.2011.**
5. **МУ 2.6.1.2398-08. Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка земельных участков под строительство жилых домов, зданий и сооружений общественного и производственного назначения в части обеспечения радиационной безопасности. Методические указания. СПб., 2008.**
6. **Световидов А.В., Венков В.А., Горский Г.А. Опыт проведения радонозащитных мероприятий в эксплуатируемых зданиях//Радиационная гигиена. 2009. Т. 2, № 4. С. 35-39.**
7. **Кононенко Д.В., Кормановская Т.А. Влияние радонозащитных мероприятий в детских образовательных учреждениях на радиационный риск при облучении радоном (на примере одной из школ Санкт-Петербурга)//Анализ риска здоровью. 2014. № 2, С. 90-96.**

8. Васильев А.С., Романович И.К., Кононенко Д.В., Кормановская Т.А., Сапрыкин К.А., Балабина Т.А. Обоснование методических подходов к контролю содержания радона в воздухе помещений эксплуатируемых общественных зданий с некруглосуточным пребыванием людей//Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 3. С. 29-40. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-29-40.
9. Кононенко Д.В. Анализ распределений значений объемной активности радона в воздухе помещений в субъектах Российской Федерации//Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 1. С. 85-103. DOI:10.21514/1998-426X-2019-12-1-85-103.
10. Цапалов А.А., Киселев С.М., Ковлер К.Л., Микляев П.С., Петрова Т.Б., Жуковский М.В., Ярмошенко И.В., Маренный А.М., Тутельян О.Е., Кувшинников С.И. Стандартизация контроля радона в зданиях на основе рационального критерия оценки соответствия//Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 4. С. 84-104. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-4-84-104.
11. Кононенко Д.В. Анализ применимости существующих моделей расчета риска при облучении радоном для оценки эффективности радонозащитных мероприятий в детских образовательных учреждениях//Радиационная гигиена. 2014. Т. 7, № 4. С. 92-98.
12. ICRP Publication 126. Radiological Protection against Radon Exposure. Ann. ICRP, vol. 43, no. 3, 2014. Труды МКРЗ. Радиологическая защита от облучения радоном. Перевод публикации 126. МКРЗ. М.: изд-во «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России», 2015, 88 с. ISBN 978-5-9035926-06-8.
13. S.M. Khan, G. James, D.R. Krewski, «Radon interventions around the globe. A systematic review», *Heliyon*. No. 5, 2019. e01737. URL: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01737 (дата обращения: 6.11.2024).
14. ISO/IEC Guide 98–3. Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995). International Organization for Standardization and International Electrotechnical Commission, 2008.
15. Маренный А.М., Цапалов А.А, Микляев П.С., Петрова Т.Б. Закономерности формирования радонового поля в геологической среде. М.: издательство «Перо» (ISBN 978-5-906883-94-0), 2016, 394 с.
16. МУ 2.6.1.038-2015. Оценка потенциальной радоноопасности земельных участков под строительство жилых, общественных и производственных зданий. Методические указания. Утверждены и введены в действие Федеральным медико-биологическим агентством 14.05.2015. М.: фонды ФГУП НТЦ РХБГ. 2015. 28 с.
17. Открытое письмо в редколлегию и совет журнала «Радиационная гигиена», 11.09.2023. URL: https://disk.yandex.ru/i/jNcsKPQUQfjJYQ (дата обращения: 17.10.2024).
18. A. Tsapalov, K. Kovler, M. Shpak et al. «Involving schoolchildren in radon surveys by means of the «RadonTest» online system», *Journal of Environmental Radioactivity,* no. 217, pp. 106-215, 2020. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2020.106215.
19. A. Tsapalov, K. Kovler, P. Bossew Strategy and Metrological Support for Indoor Ra-don Measurements Using Popular Low-Cost Active Monitors with High and Low Sensitivity // Sensors. 2024; 24(15):4764. URL: https://doi.org/10.3390/s24154764 (дата обращения: 6.11.2024).
20. Давыдов А.А., Библин А.М., Кононенко Д.В. Проблемы риск-коммуникации по вопросу облучения радоном: результаты всероссийского социологического исследования//Анализ риска здоровью. 2021. № 3. С. 29-41. DOI:10.21668/health.risk/2021.3.03.
21. Официальный сайт ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева. Радон: что о нееем нужно знать. URL: http://niirg.ru/News.php?subaction=showfull&id=1713255862 (дата обращения: 23.09.2024).
22. Маренный А.М., Киселееее С.М. Национальные радоновые программы: Опыт реализации и задачи на перспективу//Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 2 (Спецвыпуск). С. 97-108. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-10-2s-97-108.

23. Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности. Общие требования безопасности. Серия норм безопасности МАГАТЭ, № GSR Part 3. Вена: МАГАТЭ, 2015. 477 с.
24. IAEA TC Project RER9127 «Establishing Enhanced Approaches to the Control of Public Exposure to Radon».
25. IAEA TC Project RER9136 «Reducing Public Exposure to Radon by Supporting the Implementation and Further Development of National Strategies».
26. IAEA TC Project RER9153 «Enhancing the Regional Capacity to Control Long Term Risks to the Public due to Radon in Dwellings and Workplaces».
27. Стамат И.П. Отчет о НИР «Методическое обеспечение регулирования радонобезопасности населения. Разработка и обоснование основных положений методических указаний по формированию региональных целевых программ, направленных на обеспечение радонобезопасности населения России». Контракт № 20-3-14-2012 от 13 августа 2012. ФБУН Научно-исследовательский институт радиационной гигиены им. проф. П.В. Рамзаева. СПб. 2012.
28. Стамат И.П. Отчет о НИР «Разработка предложений по формированию национального плана действий в части совершенствования инфраструктуры регулирования радонобезопасности населения». Контракт 31401099476 от 25.04.2014 г. ФБУН Научно-исследовательский институт радиационной гигиены им. проф. П.В. Рамзаева. СПб, 2014.
29. Онищенко Г.Г., Романович И.К. Основные направления обеспечения радиационной безопасности населения Российской Федерации на современном этапе//Радиацинная гигиена. 2014. Т. 7, № 4. С. 5-13.
30. Стамат И.П., Кормановская Т.А., Горский Г.А. Радиационная безопасность населения России при облучении природными источниками ионизирующего излучения: современное состояние, направления развития и оптимизации//Радиационная гигиена. 2014. Т. 7, № 1. С. 54-62.
31. Киселев С.М., Жуковский М.В., Стамат И.П., Ярмошенко И.В. Радон: От фундаментальных исследований к практике регулирования. М.: изд-во «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России», 2016. 432 с.
32. Киселев С.М., Стамат И.П., Маренный А.М., Ильин Л.А. Радон: проблемы и пути решения//Гигиена и санитария. 2018. № 97(2). DOI: 10.18821/0016-9900-2018-97-2.
33. ФЦП ЯРБ-2. Официальный сайт. URL: https://фцп-ярб.рф/about/overview/ (дата обращения: 23.09.2024).
34. Цапалов А.А., Микляев П.С., Петрова Т.Б., Кувшинников С.И. Кризис регулирования радона в России: масштаб проблемы и предложения по исправлению. Доклад на «Кротковских чтениях», ФГБОУ ДПО РМАНПО Минздрава России, Москва, 28 февраля 2024. URL: https://www.doza.ru/files/krizis_regulirovaniya_radona_Presentation.pdf (дата обращения: 22.10.2024).

Radon Regulation Crisis in Russia: Discussion with the Regulator on Actual Issues. Part 1

Tsapalov Andrey [1], Miklyaev Petr [2], Petrova Tatiana [3], Kuvshinnikov Sergey [4]

[1] Scientific Production Company "Doza", Ltd, Zelenograd, Russia, Moscow

[2] Sergeev Institute of Environmental Geoscience Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow

[3] Lomonosov Moscow State University, Russia, Moscow

[4] Federal Center of Hygiene and Epidemiology, Federal Service for Surveillance on Consumer rights Protection and Human Well-Being, Russia, Moscow

Abstract. **The first part of the article continues the discussion with the responsible regulator on the actual issues of radon regulation, such as (i) the problem of indoor radon mitigation, (ii) the problem of radon measurements and conformity assessment, (iii) the problem of public awareness and responsibility for radon control, and (iv) the problem of developing a national radon action plan. The second part of the article will be published in the next issue and will be devoted to a detailed discussion of MR 2.6.1.0333-23 in terms of indoor radon measurements in comparison with an alternative method based on rational principle of measurements.**

Keywords: *radon, buildings, risk, regulation, reference level, measurements, conformity assessment, radon mitigation, public awareness, national action plan, federal target program.*

А.А.Цапалов [1] (к.т.н., с.н.с.), П.С.Микляев [2] (д.геол.-мин.н., профессор РАН, зам.директора), Т.Б.Петрова [3] (к.т.н., с.н.с.), С.И.Кувшинников [4] (эксперт-физик)

[1] Научно-производственное предприятие «Доза», г. Зеленоград

[2] Институт геоэкологии им. Е.М.Сергеева РАН, г. Москва

[3] Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», г. Москва

[4] Федеральный центр гигиены и эпидемиологии, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, г. Москва

Контакты: тел. +7 (910) 451-7305; e-mail: andrey-ants@yandex.ru

DOI: 10.37414/2075-1338-2024-119-4-90-92

Верна ли таблица умножения?

Ю.Н.Мартынюк
(НПП «Доза», г. Москва, г. Зеленоград)

В последнее время, год или два, мне, как научному руководителю НПП «Доза», часто присылают письма с вопросами, которые раньше никогда не возникали. Эти вопросы интересны тем, что на них нет вразумительных ответов, но и без ответов их тоже оставить нельзя. В таких случаях остается только дезавуировать вопрос как не имеющий смысла. Примеры? Вот вопрос, который задавали не раз. «В руководстве по эксплуатации дозиметра Х указано, что он устойчив к воздействию постоянного магнитного поля напряженностью до 400 А/м. Мы проводим измерения мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения в поле. Эксперты по аккредитации нашей ЛРК требуют доказать, что реальная напряженность магнитного поля в поле не превышает 400 А/м. Что нам делать? Хотим купить прибор для измерения напряженности поля. Какой вы рекомендуете?»

Казалось бы, что тут думать? Покупаете измеритель напряженности поля необходимого диапазона, берете его с собой в поле, измеряете напряженность магнитного поля в точке измерения, убеждаетесь, что она (напряженность) не превышает 400 А/м и вписываете это в протокол. Но нет же. Сначала вам нужно убедиться, что измеритель напряженности поля работает в условиях, предусмотренных его руководством по эксплуатации. Т. е., измерить температуру, давление, влажность, амплитуду вибраций, уровень электромагнитных помех промышленной частоты, уровень помех радиочастотного диапазона, фоновую мощность дозы гамма-излучения… Для всего этого вам нужно купить целый перечень приборов, но и они работают только в условиях, указанных в их руководствах по эксплуатации, и наличие этих условий необходимо подтвердить соответствующими измерениями.

В связи с этим уже у меня возникает вопрос: а как же мы раньше жили? Ведь, рассуждая согласно приведенной выше схеме, мы вынуждены будем априори забраковать все, без исключения, данные, полученные в результате измерений, поскольку их корректность принципиально недоказуема.

Вот тут к нам на помощь приходит умение использовать известные знания для оценки наличия факторов, влияющих на измерения. Рассматривая пример с напряженностью магнитного поля в чистом поле, мы можем вспомнить, что магнитное поле есть у Земли, в среднем его напряженность равна 40 А/м, колеблясь в пределах от 27 А/м до 160 А/м вблизи Курской магнитной аномалии, и нигде не превышает величины 200 А/м, а еще магнитное поле возникает вблизи проводников с током или намагниченных материалов. Если мы не видим в поле рядом с нами трансформаторов или линий электропередачи, то

логично предположить, что напряженность поля в точке измерения не превышает магнитного поля Земли, т. е. не влияет на работу дозиметра. К сожалению, уровень знаний многих нынешних «экспертов» не позволяет здраво судить о таких сложных материях. С их точки зрения, единственное доказательство – это протокол, а рассуждения и призывы к здравому смыслу – всего лишь досужие спекуляции. Откровенно говоря, я каждый год жду момента, когда меня спросят, на каком основании я пользуюсь таблицей умножения. Она ведь не внесена в перечни разрешенных к применению верифицированных справочников, не имеет аттестации, печатей авторитетных уполномоченных органов и комиссий. Или как мы можем, например, доверять расчетам, проведенным с помощью EXCEL?

На измерительную аппаратуру могут оказывать влияние десятки факторов. При проведении приемочных испытаний проверяют влияние всех факторов, перечисленных в нормативной документации, в зависимости от назначения средства измерения и особенностей его эксплуатации. При испытаниях выделяют факторы, которые оказывают существенное влияние на метрологические характеристики. ГОСТ 8.508-84 предписывает: «п. 2.7.5.1. Внешнюю величину (параметр) считают оказывающей существенное влияние на метрологическую (точностную) характеристику, если при ее изменении в пределах рабочего диапазона данная характеристика изменяется более чем на 20% значения, нормированного для нормальных условий». Далее для факторов, признанных существенными, определяют дополнительную погрешность, связанную с данным фактором. Например, «дополнительная погрешность влияния температуры составляет 3% на каждые 10 °С». Для факторов, признанных несущественными, могут указывать предельную дополнительную погрешность во всем диапазоне изменения влияющего фактора. Например, «дополнительная погрешность, связанная с воздействием влажности воздуха, не превышает 5%». На практике это означает, что не удалось зафиксировать влияние этого фактора с точностью 5%. То есть, фактор может вообще не оказывать никакого влияния, но точность метода испытаний позволяет определить это с точностью 5%.



Понятно, что если «честно» суммировать влияние всех воздействующих факторов при расчете неопределенности измерений, то эта неопределенность редко будет меньше 100%. Несколько десятков факторов, максимальное влияние которых оценено в 5%, в сумме дадут значительную величину. Именно поэтому среди всех факторов выделяют «существенные» и «несущественные». Существенные факторы отмечают в руководстве по эксплуатации, либо в разделе «Эксплуатационные ограничения», либо в разделе «Технические характеристики».

При оценке неопределенности следует учитывать влияющие факторы, если есть осно-

вания предполагать их наличие. Например, вибрации или сейсмические воздействия. Человек с легкостью, так сказать, органолептически, может определить , есть вибрации или удары, или нет. Про магнитное поле я уже упомянул выше, электромагнитные помехи промышленной частоты можно ожидать там, где есть промышленная сеть, т. е. не в МЭК 61326-2014 определяет три типа электромагнитной обстановки: базовую, промышленную и контролируемую. Базовая электромагнитная обстановка (basic electromagnetic environment): обстановка, существующая в местах с электроснабжением непосредственно от распределительной сети низкого напряжения.

Примеры

1. Жилые помещения, например, дома, квартиры.

2. Точки розничной торговли, например, магазины, супермаркеты.

3. Служебные помещения, например, офисы, банки.

4. Зоны массового отдыха, например, кинотеатры, бары, танцевальные залы.

5. Объекты на открытом воздухе, например, заправочные станции, парковки, развлекательные и спортивные центры.

Для этих мест установлены предельные величины воздействующих факторов электромагнитной природы, которые не требуют инструментального подтверждения.

Соответствующие условия установлены для промышленной и контролируемой электромагнитной обстановки.

Кстати, цитируемый выше ГОСТ Р МЭК 61326-2014 устанавливает для переносного оборудования обязательное требование устойчивости в условиях базовой электромагнитной остановки. Таким образом, в перечисленных выше местах с базовой электромагнитной обстановкой можно использовать без ограничения переносные приборы, соответствующие требованиям ГОСТ Р МЭК 61326-2014.

Похожие рассуждения можно привести, обсуждая вопрос эксплуатации приборов в атмосферах различного типа.

На протяжении всей истории измерений качество их определялось хорошо проработанными методами, предполагающими анализ самих результатов измерений, выявление грубых ошибок, внешнего влияния различных факторов, исходя из поведения прибора, вида распределения результатов, динамики, наконец, использования параллельных измерений в сомнительных случаях. Показательно, что специалисты, проводящие измерения, как правило, владеют этими методами, грамотно проводя анализ качества измерений и четко отслеживая сомнительные результаты. Все, без исключения, руководства по оценке неопределенности измерений указывают, что в процедуре оценки неопределенности существенную роль играет мнение эксперта, проводящего оценку.

Так чего же мы все-таки хотим? Остался лишь один шаг до замыкания круга абсурда и появления требований наличия бесконечной цепочки приборов, доказывающих взаимную правомерность их применения. И этот шаг трудно будет назвать шагом вперед.

Is the Multiplication Table Correct?

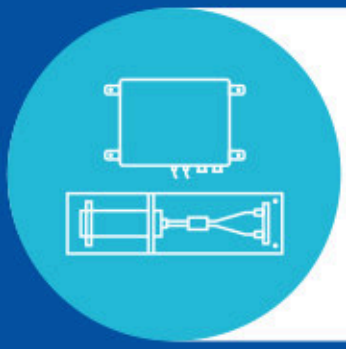
Martyniuk Yuri (SPC «Doza», Ltd, Zelenograd, Russia)

Ю.Н.Мартынюк (к.ф.-м.н., научный рук.) – НПП «Доза», г. Зеленоград

Контакты: тел. +7 (495) 777-84-85, martin@doza.ru

ПРЕДНАЗНАЧЕН
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МОЩНОСТИ
АМБИЕНТНОГО ЭКВИВАЛЕНТА
ДОЗЫ (МАЭД) И МОЩНОСТИ
ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ (МПД)
ГАММА- И РЕНТГЕНОВСКОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ В ВОЗДУХЕ

НПП ДОЗА



ДБГ-С101Д

ДОЗИМЕТР ФОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ



ПРИМЕНЕНИЕ

контроль радиационной обстановки на объектах, связанных с получением, переработкой и использованием радиоактивных материалов

ОСОБЕННОСТИ

работает как самостоятельно, так и в составе систем, комплексов и установок радиационного контроля

ДИАПАЗОН ИЗМЕРЕНИЙ

- МАЭД: $1 \cdot 10^{-5} \div 1 \cdot 10^{4}$ Зв/ч
- МПД: $1 \cdot 10^{-5} \div 1 \cdot 10^{4}$ Гр/ч

www.doza.ru +7 (495) 777 84 85 info@doza.ru

БЛОК ДЕТЕКТИРОВАНИЯ

БДМГ-А02Д

ДОЗА

БЛОК ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ АВАРИЙНЫХ И ПОСТАВАРИЙНЫХ УСЛОВИЙ

НАЗНАЧЕНИЕ:

измерение мощности поглощенной дозы при авариях на объектах ЯТЦ и АЭС.

СВОЙСТВА:

- интерфейсы связи RS-485, Ethernet;
- коммутационные приспособления для упрощения монтажа/демонтажа;
- наличие выхода «сухой контакт»;
- аналоговый выход (4 ÷ 20 мА).





КОМПЛЕКТ ПОСТАВКИ:

- модуль ионизационной камеры МИК-02Д с линиями связи – 1 шт.;
- блок обработки и передачи данных БОПД-А02Д – 1 шт.

ПО ЗАКАЗУ:

- ввод электрический герметичный сквозь оболочку здания реактора – 1 шт.

НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ:

- сертификат в системе сертификации ОИАЭ;
- номер в госреестре РФ: 78755-20.

www.doza.ru +7 (495) 777 84 85 info@doza.ru