

6. Litvin V.S., Belyaev A.D., Ignatov S.M. e.a. ZnS(Ag)/<sup>6</sup>LiF and LiI(Eu) scintillators and silicon photomultipliers for thermal neutron detectors with high space and time resolution. — *Bul. Rus. Academy of Sci.: Phys.*, 2009, v. 73, № 2, p. 219—221.
7. Osovizky A., Pritchard K., Ziegler J. e.a. <sup>6</sup>LiF:ZnS(Ag) mixture optimization for a highly efficient ultrathin cold neutron detector. — *IEEE Transac. Nucl. Sci.*, 2018, v. 65, № 4, p. 1025—1032.
8. Pritchard K., Osovizky A., Ziegler J. e.a. <sup>6</sup>LiF:ZnS(Ag) neutron detector performance optimized using waveform recordings and ROC curves. — *Ibid.*, 2019, v. 67, № 1, p. 414—421.
9. Pritchard K., Hussey D., Ziegler J. e.a. Cold neutron radiation dose effects on a <sup>6</sup>LiF:ZnS(Ag) neutron detector with wavelength shifting fibers and SiPM photodetector. — *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Sec. A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2021, v. 986, p. 1—4.
10. Stoykov A., Mosset J. B., Hildebrandt M. Evaluation of a ZnS:<sup>6</sup>LiF based scintillation neutron detector at high counting rates. — *Ibid.*, 2019, v. 936, p. 34—35.
11. Гулаков И.П. Регистрация ионизирующих излучений. Учебное пос. Минск: Вышэйшая школа, 2021. 287 с.
12. Wu C., Tang B., Sun Z.J. e.a. A study of ZnS(Ag)/<sup>6</sup>LiF with different mass ratios. — *Rad. Measurements*, 2013, v. 58, p. 128—132.
13. Marin V.N., Sadykov R.A., Trunov D.N. e.a. A new type of thermal-neutron detector based on ZnS(Ag)/LiF scintillator and avalanche photodiodes. — *Techn. Phys. Lett.*, 2015, v. 41, № 9, p. 912—914.
14. Zaitseva N., Rupert B.L., Pawełczak I. e.a. Plastic scintillators with efficient neutron/gamma pulse shape discrimination. — *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Sec. A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2012, v. 668, p. 88—93.

Поступила в Редакцию 30.06.22

УДК 621.039.8

## РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОГО РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ГАЗОАЭРОЗОЛЬНЫХ СРЕД

Кишев В.А., Иванов А.А., Ветошкин Е.М., Чебышов С.Б., Голубев В.Г. (АО «СНИИП», г. Москва)  
e-mail: vakishev@sniip.ru

Требования к оборудованию непрерывного контроля объемной активности компонентов газоаэрозольного выброса атомных станций — радиоактивных благородных газов, аэрозолей, радиоиода штатными каналами систем радиационного контроля изложены в стандарте СТО 1.1.1.04.0811—2010 АО «Концерн Росэнергоатом». Стандарт был разработан и внедрен в соответствии с требованиями отечественных и международных нормативных документов, актуальных и в настоящее время.

Несмотря на отсутствие принципиальных изменений в нормативной базе и действующих стандартах, в исходные технические требования проектируемых объектов использования атомной энергии заложены метрологические характеристики, превышающие стандартизованные: диапазон измерений расширен, основная погрешность средств измерений снижена. Так, для измерительных каналов объемной активности радиоактивных благородных газов строящихся станций предел измерений установлен на уровне 37 ТБк/м<sup>3</sup>. Верхние границы диапазона измерений объемной активности аэрозольной и иодной составляющих достигают 37 и 370 МБк/м<sup>3</sup> соответственно, основная относительная погреш-

ность измерений в указанных диапазонах сопоставима с погрешностью вторичных эталонов и составляет ±20% [1].

Анализ потребностей, а также невозможность достижения указанных параметров путем локальной модернизации блоков и устройств детектирования, реализованных на устаревшей компонентной базе, заложили фундамент научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, направленных на совершенствование программно-технических средств радиационного контроля.

**Непрерывный контроль радиоактивных благородных газов.** Газоаэрозольные выбросы на атомных станциях и других предприятиях, связанных с получением или переработкой ядерного топлива, являются результатом работы систем спецвентиляции и технологических сдувок. Для атомных станций изотопный состав газоаэрозольного выброса зависит не только от типа реакторной установки и технологического процесса, но и от режима эксплуатации. Вследствие этого непрерывный контроль объемной активности радиоактивных благородных газов сводится к регистрации суммарной активности предварительно очищенного воздуха кремние-



Р и с. 1. Устройство детектирования УДГБ-47Р

выми детекторами, ионизационными камерами или сцинтилляторами [2].

Для непрерывного контроля объемной активности радиоактивных благородных газов реализовано устройство УДГБ-47Р, показанное на рис. 1. Его технические и метрологические характеристики в сравнении с блоками и устройствами детектирования разных производителей приведены в табл. 1.

Достижение нижнего предела измерений в блоках обеспечивается сцинтилляторами с большой развитой поверхностью и низкой чувствительностью к  $\gamma$ -излучению: сцинтилляторы в виде пленки, используемые в БДГБ-40П, были заменены на пластиковые без потери эффективной площади детектора [3].

Замена чувствительных элементов также позволила решить проблему, выявленную при эксплуатации блоков: сорбцию радиоактивных благородных газов в объеме измерительной камеры при длительной прокачке высокоактивных проб. Выявленный недостаток выражался в повышении уровня собственного фона блока и требовал многочасовой продувки чистым воздухом для возвращения к допустимым значениям. Обнаруженный эффект был устранен на технологическом уровне с применением специально-

го покрытия детектирующего материала, использование которого было невозможным для гибких пленочных сцинтилляторов.

Регистрация излучения в диапазоне измерений достигается за счет работы устройства в двух режимах: импульсном — чувствительный поддиапазон и токовом — грубый поддиапазон. Для грубого поддиапазона УДГБ-47Р с заявленной погрешностью подтверждено значение  $370 \text{ ГБк/м}^3$ . Полученный результат обусловлен отсутствием возможности воспроизведения заявленной объемной активности рабочими эталонами, подтверждение линейности характеристики с допусаемой погрешностью с заимствованием эталонов из других поверочных схем не представилось возможным.

Актуальным остается изучение зависимости чувствительности от парциальной объемной активности газового выброса [4]. Для натуральных испытаний доступным является только  $^{85}\text{Kr}$ . Из-за отсутствия эталонов с требуемой номенклатурой радионуклидов проблема по-прежнему остается в расчетно-теоретической плоскости.

**Непрерывный контроль радиоактивного иода.** Все известные изотопы иода являются продуктами осколочного деления ядер [5]. При выбросе в атмосферу они становятся критическим компонентом загрязнения внешней среды из-за их высокой биологической активности и радиотоксикологического действия с концентрированием в щитовидной железе. Самым опасным изотопом признан  $^{131}\text{I}$  вследствие большого периода полураспада 8 сут и высокого выхода. Для измерения его объемной активности было разработано устройство детектирования УДАГ-09Р (рис. 2, табл. 2).

Для улавливания паров  $^{131}\text{I}$  проводится прокачивание контролируемой пробы, предварительно очищенной от аэрозольной фракции,

Т а б л и ц а 1. Характеристики средств измерений объемной активности радиоактивных благородных газов разных производителей

Характеристика	БДГБ-40Р (Россия)	УДГ-1Б (Россия)	NGM 202L (Франция)	УДГБ-47Р (Россия)
Диапазон измерений, Бк/м <sup>3</sup>	$10^4$ — $3,7 \cdot 10^8$	$10^4$ — $3,7 \cdot 10^{10}$	$3,7 \cdot 10^4$ — $3,7 \cdot 10^9$	$10^3$ — $3,7 \cdot 10^{11}$
Погрешность измерения, %	20	20	20	20
Масса, не более, кг	400	18	100	100
Срок службы, лет	10	15	—	15
Интерфейс	Счетный выход	RS-485, Ethernet	RS-485	RS-485, USB

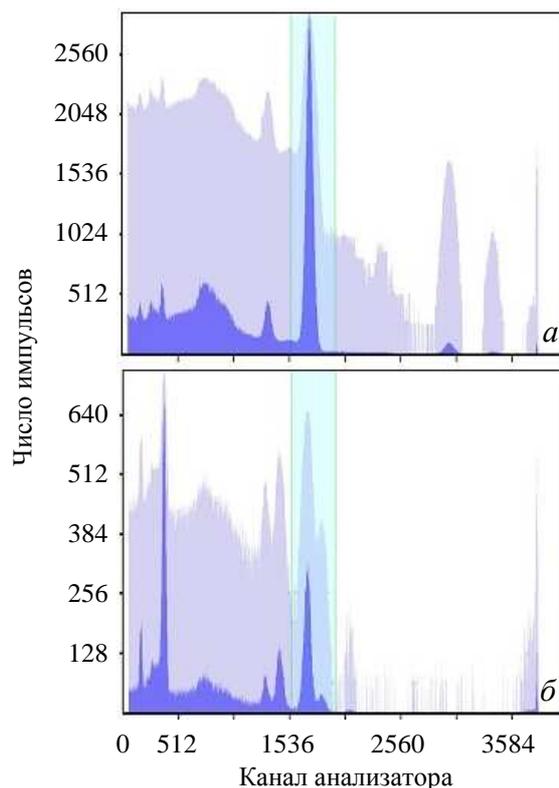


Р и с. 2. Устройство детектирования УДАГ-09Р

через пробоотборный тракт устройства. Для повышения эффективности сорбции был разработан и запатентован сорбционный картридж в форме сосуда Маринелли [6]. Для компенсации внешнего фона применена вольфрамовая защита.

Для регистрации излучения был разработан узел детектора на основе кристалла  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ . Линейная зависимость световыхода от температуры кристалла позволяет без конструктивных доработок (размещения метки  $^{241}\text{Am}$  со стабилизацией по пику) и дополнительных схемотехнических решений (размещение дополнительных светодиодов) обеспечить стабильность измерений в широком диапазоне температуры — от  $-10$  до  $60$  °С без нормирования дополнительной погрешности. Высокое разрешение кристаллов  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  также позволит определять объемную активность других изотопов иода с атомным номером 132, 133, 135. Примеры аппаратурных линий УДАГ-09Р для  $^{131}\text{I}$  и  $^{133}\text{Ba}$  показаны на рис. 3.

Указанные метрологические характеристики уточнены в ходе лабораторных и предварительных испытаний. Их подтверждение планируется с использованием вторичного эталона паров  $^{131}\text{I}$ , в настоящее время проходящего аттестацию в АО «СНИИП».

Р и с. 3. Аппаратурные линии УДАГ-09Р при измерении  $^{131}\text{I}$  (а) и  $^{133}\text{Ba}$  (б)

Несмотря на требования к улучшению характеристик приборов непрерывного радиационного контроля, по-прежнему остается актуальным корректный учет потерь при транспортировке пробы. Для получения достоверной информации о выбросе необходима разработка методик поверки (калибровки) конкретных измерительных каналов с учетом их размещения на объекте.

**Непрерывный контроль радиоактивных аэрозолей.** Измерение их объемной активности основано на аспирации контролируемой пробы на фильтрующих материалах, которые обеспечивают эффективное улавливание аэрозольных частиц с регламентированными размерами  $0,1$ — $10$  мкм [7]. Представительность пробы зависит непосредственно от конструкции пробоотборного тракта и методов транспортировки.

Т а б л и ц а 2. Характеристики средств измерений паров  $^{131}\text{I}$  в воздушной среде разных производителей

Характеристика	БДАГ-05Р1 (Россия)	ИМ 201L (Франция)	УДИ-1Б (Россия)	УДАГ-09Р (Россия)
Диапазон измерений, Бк/м <sup>3</sup>	$3,7 \cdot 10^{-2}$ — $3,7 \cdot 10^6$			
Погрешность измерения, %	50	—	50	30
Масса, не более, кг	420	220	29,5	62
Интерфейс	RS-485, RS-232	RS-485	RS-485, Ethernet	RS-485, USB

Таблица 3. Характеристики средств измерений  $\alpha$ -,  $\beta$ -аэрозолей разных производителей

Характеристика	БДАС-05Р (Россия)	УДА-1АБ (Россия)	АРВМ 205L (Франция)
Диапазон измерений, Бк/м <sup>3</sup> :			
$\alpha$ -	$10^{-2}$ — $2 \cdot 10^5$	$10^{-2}$ — $2 \cdot 10^5$	$10^{-2}$ — $3,7 \cdot 10^6$
$\beta$ -	$2 \cdot 10^{-2}$ — $4 \cdot 10^7$	$10^{-1}$ — $1 \cdot 10^7$	$10^{-1}$ — $1,1 \cdot 10^7$
Погрешность измерений, %	50 до 1 Бк/м <sup>3</sup> , 20 свыше 1 Бк/м <sup>3</sup>	50 до 1 Бк/м <sup>3</sup> , 20 свыше 1 Бк/м <sup>3</sup>	—
Масса, не более, кг	60	29,5	45
Интерфейс	RS-485, USB	RS-485, Ethernet	RS-485

Для непрерывного контроля объемной активности  $\alpha$ - и  $\beta$ -аэрозолей был разработан блок детектирования БДАС-05Р. Сравнение характеристик БДАС-05Р с существующим оборудованием отечественных и зарубежных производителей приведено в табл. 3.

Процесс осаждения в пробоотборном тракте блока детектирования БДАС-05Р был смоделирован с помощью пакетов SolidWORKS FlowSimulation (США). Результаты моделирования были верифицированы посредством испытаний макета на вторичном эталоне радиоактивных аэрозолей. При сравнении результатов прокачки пробы с одинаковой скоростью в параллельно подключенных к эталону ветках с макетом пробоотборного тракта и эталонным фильтром АФА-РСП расхождение активности осажденных  $\alpha$ - и  $\beta$ -аэрозолей не превышало 20%.

Для регистрации  $\alpha$ -,  $\beta$ -частиц в блоке детектирования БДАС-05Р используется двухканальный узел с ионно-имплантированными кремниевыми детекторами площадью  $\sim 2$  см<sup>2</sup>, сопоставимой с размером аспирационного пятна. Детекторы обеспечивают необходимый энергетический диапазон 50 кэВ—8 МэВ (50 кэВ—3 МэВ для  $\beta$ -, 3—8 МэВ для  $\alpha$ -излучения). Для исключения влияния на измерения естественных радионуклидов реализован спектрометрический метод компенсации дочерних продуктов распада радона.

Как и в случае контроля объемной активности радиоиода, улучшение характеристик измерительных каналов радиоактивных аэрозолей является частью цели достоверного определения объемной активности составляющей выброса. Аттестованные в лабораторных условиях радиометры не учитывают температуру и влажность среды, длину и внутреннее состояние пробоотборной магистрали. Для получения объ-

ективной информации необходим корректный учет потерь при транспортировке пробы.

**Заключение.** Достоверная оценка газоаэрозольного выброса объекта использования атомной энергии обеспечивается метрологическими характеристиками технических средств и методическим обеспечением измерений.

Для обеспечения измерений с указанными нормами точности функциональные узлы устройств и применяемые схмотехнические решения выполнены на современной электронной компонентной базе с использованием микросхем зарубежного производства в общепромышленном исполнении, но не содержат уникальных импортных технических решений и изделий. Отдельное внимание следует уделить возможности замены используемых комплектующих на отечественные аналоги.

Текущее состояние развития аппаратуры непрерывного радиационного контроля объемной активности компонентов газоаэрозольного выброса позволяет регистрировать выбросы на уровне несколько процентов допустимых. Однако для проектируемых АСРК по-прежнему актуален учет состава выброса и потерь при транспортировке отбираемых проб.

Дальнейшее совершенствование штатных каналов систем радиационного контроля требует дополнительных исследований и взаимодействия научно-исследовательских и проектных институтов, эксплуатирующих организаций.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Об утверждении** государственной поверочной схемы для средств измерений объемной активности радиоактивных аэрозолей. Приказ Росстандарта № 2826 от 29.12.2018. Опубликован на сайте Росстандарта. URL: [http:// www.rst.gov.ru](http://www.rst.gov.ru).
2. **Фертман Д.Е., Чебышов С.Б.** Радиометрия сред. М., АО ФИД «Деловой экспресс», 2017. 288 с.

3. **Леонов А.Ф., Личманова В.Н., Сошин Н.П. и др.** Сцинтиллятор. Патент РФ 2279692. Заявл. 22.04.2005. Оpubл. 10.07.2006. — Бюл. «Изобретения. Полезные модели», 2006, № 12.
4. **Полянцеv С.С., Пыркoв И.В., Григорьев Е.И.** Актуальные вопросы контроля газoаэрозольных выбросов на АЭС. — АНРИ, 2009, вып. 2, с. 37—46.
5. **Стыро Б.И.** Изотопы иода и радиационная безопасность. СПб: СПб Гидрометеoиздат, 1992. 255 с.
6. **Ермаков Г.К., Федотов В.С., Андрианов Т.С. и др.** Сорбционный картридж. Патент РФ 171243. Заявл. 28.09.2016. Оpubл. 25.05.2017. — Бюл. «Изобретения. Полезные модели», 2017, № 15.
7. **Филатов Ю.Н., Филатов И.Ю., Капустин И.А.** Фильтрующий материал. Патент РФ 2414950. Заявл. 09.07.2009. Оpubл. 27.03.2011. — Там же, 2011, № 9.

Поступила в Редакцию 30.06.22

УДК 621.039.31

## РАСЧЕТ МНОГОЭТАПНЫХ СХЕМ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ ИЗОТОПОВ В КАСКАДЕ ГАЗОВЫХ ЦЕНТРИФУГ С ПЕРЕМЕННЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ РАЗДЕЛЕНИЯ

*Палкин В.А. (Уральский федеральный ун-т, г. Екатеринбург)*

e-mail: profp2004@mail.ru

В ядерно-физических исследованиях, ядерной энергетике, медицине и других приложениях требуются высококонцентрированные изотопы разных химических элементов. Их производство предполагает решение расчетно-теоретических задач, связанных с каскадированием газовых центрифуг. Целевой изотоп с наибольшим или наименьшим массовым числом можно обогатить до высокой концентрации в ординарном (трехпоточном) каскаде за один этап разделения. Для этого требуются длинный каскад и рабочее вещество с одним изотопом нецелевых элементов. При малой исходной концентрации изотопы обогащаются в несколько этапов разделения. Возможность концентрирования компонентов с промежуточной массой в отборе ординарного каскада ограничена концентрацией питания более легких изотопов. Чем она выше, тем меньше предельная концентрация промежуточного компонента. Однако этот изотоп можно концентрировать путем создания специального режима в дополнительном отборе каскада [1, 2]. При дополнительных условиях можно также концентрировать одновременно два промежуточных компонента в двух дополнительных отборах каскада [3, 4]. При малом содержании промежуточного изотопа в питании каскада его концентрация в дополнительных отборах и извлечение будут невысокими. Это ограничивает применение данных методов. Поэтому эффективнее использовать многоэтапную наработку концентрированного изотопа, а в отдельных случаях и системы каскадов [5—8].

Целью настоящей работы являлся расчет эффективных схем многоэтапного концентрирования изотопов с учетом их различия в природном содержании. Исследования проведены путем вычислительного эксперимента по разделению пятикомпонентных изотопных смесей с модельными характеристиками газовых центрифуг. Использован метод расчета каскада газовых центрифуг с их заданным числом в ступенях и коэффициентами разделения, зависящими от параметров потоков [8]. Определены особенности получения высококонцентрированных изотопов германия, никеля и вольфрама.

**Параметры и уравнения каскада.** Схема трехпоточного противоточного симметричного каскада, состоящего из  $n$  ступеней, приведена на рисунке. В ступень с номером  $f$  подается внешний поток питания  $F$ . Из первой ступени отбирается поток отвала каскада  $W$ , в котором обо-

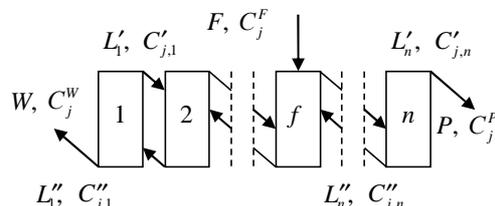


Схема ординарного противоточного симметричного каскада: 1, 2,  $f$ ,  $n$  — номер ступени;  $F$ ,  $P$ ,  $W$  — потоки питания, отбора, отвала каскада;  $C_j^F, C_j^P, C_j^W$  — концентрация  $j$ -го изотопа в потоках питания, отбора, отвала каскада;  $L_1', L_1''$  — потоки отбора, отвала 1-й ступени;  $L_n', L_n''$  — потоки отбора, отвала  $n$ -й ступени;  $C_{j,1}', C_{j,1}''$  — концентрация  $j$ -го изотопа в отборе, отвале 1-й ступени;  $C_{j,n}', C_{j,n}''$  — концентрация  $j$ -го изотопа в отборе, отвале  $n$ -й ступени