

## Первичная оценка наличия альфа-излучающих нуклидов: обзор методов детектирования аэроионов и устройств на их основе

Ю. Ю. Бунькова<sup>1,2</sup>, О. В. Вольпяс<sup>1,2</sup>✉

<sup>1</sup> ФГАНУ «ЦНИИ робототехники и технической кибернетики», Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ o.volpyas@rtc.ru

**Аннотация.** Представлен обзор современной и перспективной аппаратуры сортировки и анализа радиоактивных и обычных отходов, предназначенной для поиска альфа-излучающих радионуклидов за счет регистрации аэроионов. Актуальность выявления присутствия альфа-излучающих радионуклидов обусловлена тем, что категория РАО в большой степени определяется активностью источников альфа-излучения, входящих в состав отходов, что и определяет дальнейшие меры по переработке РАО.

Рассмотрены основные принципы детектирования аэроионов, приведен обзор современного оборудования радионуклидного анализа твердых радиоактивных отходов (ТРО) и обычных отходов, обоснованы применимость детектирования аэроионов в качестве первичной оценки наличия альфа-излучающих радионуклидов и перспективы использования данного способа для обеспечения надежных и точных результатов при проведении анализа радиоактивных отходов.

**Ключевые слова:** альфа-излучение, аспирационная камера, аэроионы, детекторы, ионизирующее излучение, радиоактивные отходы, счетчики

**Для цитирования:** Бунькова Ю. Ю., Вольпяс О. В. Первичная оценка наличия альфа-излучающих нуклидов: обзор методов детектирования аэроионов и устройств на их основе // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 8. С. 31–39. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-8-31-39.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Финансирование:** Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России FNRG-2022-0014, рег. № 1021051302488-7-2.2.2; 2.3.5 «Исследование программных и аппаратных способов безопасной и эффективной сортировки радиоактивных отходов по морфологии и активности».

Review article

## Initial Assessment of the Presence of Alpha-Emitting Nuclides: A Review of Aeroion Detection Methods and Devices Based Thereon

Yu. Yu. Bunkova<sup>1,2</sup>, O. V. Volpyas<sup>1,2</sup>✉

<sup>1</sup> Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ o.volpyas@rtc.ru

**Abstract.** The article presents a review of advanced and promising equipment for sorting and analyzing radioactive and conventional waste, which can be used to search for alpha-emitting radionuclides through the registration of aeroions. The relevance of detecting the presence of alpha-emitting radionuclides is related to the following fact. The category of radioactive waste is largely determined by the activity of alpha-radiation sources incorporated in the waste, which determines further measures for radioactive waste processing.

The basic principles of aeroion detection are considered, and a review of modern equipment for radionuclide analysis of solid radioactive waste and conventional waste is carried out. The applicability of aeroion detection as a primary assessment of the presence of alpha-emitting radionuclides and the prospects of using this method to ensure reliable and accurate results in the analysis of radioactive waste are substantiated.

**Keywords:** alpha radiation, aspiration chamber, aeroions, detectors, ionizing radiation, radioactive waste, counters

**For citation** Bunkova Yu. Yu., Volpyas O. V. Initial Assessment of the Presence of Alpha-Emitting Nuclides: A Review of Aeroion Detection Methods and Devices Based Thereon // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2024. Vol. 17, no. 8. P. 31–39. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-8-31-39.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

**Funding:** The results were obtained within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of Russia FNRG-2022-0014, reg. № 1021051302488-7-2.2.2; 2.3.5 «Research of software and hardware methods for safe and efficient sorting of radioactive waste by morphology and activity».

**Введение.** За несколько прошедших десятилетий произошло большое количество техногенных аварий и катастроф на предприятиях ядерно-топливного цикла: в период с 1980 по 2011 г. было зафиксировано 197 радиационных инцидентов и аварий [1]. Количество выводимых из эксплуатации объектов стремительно растет, увеличивается объем радиоактивных отходов (РАО), требующих увеличения производительности переработки РАО. Задача по выявлению загрязненных объектов затрудняется большим количеством отходов, требующих проведения радиометрического анализа, и их сложного радионуклидного состава.

При работе с РАО наиболее сложный и трудоемкий процесс – это регистрация альфа-излучающих радионуклидов. В то же время, присутствие альфа-излучающих радионуклидов в составе РАО устанавливает категорию, присваиваемую РАО, которая определяет дальнейшие меры по переработке. Регистрация альфа-излучения и радионуклидный анализ представляют собой актуальные задачи в цикле сортировки и переработки РАО, решение которых обеспечивают устройства и системы, обзор которых приведен в данной статье.

В связи с небольшой проникающей способностью альфа-частиц дистанционное детектирование данного типа ионизирующего излучения осложнено. Пробег альфа-частиц с энергией 4 МэВ, возникающих вследствие распада  $^{238}\text{U}$ , в воздухе составляет лишь 2.5 см [2], [3]. На данный момент существуют несколько методов регистрации альфа-излучения: ионизационный, сцинтилляционный и полупроводниковый, но ни один из них не обеспечивает решение задачи дистанционного детектирования альфа-частиц.

Идея увеличения дальности обнаружения альфа-излучающих радионуклидов заключается в детектировании не самих альфа-частиц, а ионов, образующихся вследствие прохождения частиц в воздухе, – аэроионов. Считая, что средняя энергия образования пары ионов равна 33.85 эВ, каждая альфа-частица с энергией 4 МэВ в среднем образует  $1.2 \cdot 10^6$  пар ионов воздуха на длине пробега [4]. В данной статье приводится обзор методов и устройств детектирования аэроионов для первичной оценки наличия альфа-излучающих радионуклидов.

**Методы регистрации ионизирующих излучений.** С целью определения наиболее подходящих методов регистрации частиц с малым пробегом рассмотрим наиболее распространенные методы регистрации ионизирующих излучений. На текущий момент известно несколько широко распространенных методов регистрации ионизирующих излучений, включая ионизационный, сцинтилляционный и полупроводниковый методы. Основные принципы перечисленных методов представлены далее.

Сцинтилляционный метод основан на том, что после возбуждения некоторые вещества переходят в невозбужденное состояние, излучая энергию в виде световых квантов, частота которых располагается в видимой или ультрафиолетовой области. Ключевой фактор применения материала в качестве сцинтиллятора это прозрачность для собственного излучения, т. е. спектр поглощения излучения должен быть смещен относительно спектра испускания. На данный момент известно достаточное количество веществ, подходящих для создания сцинтилляционных детекторов: в зависимости от задач детектирования используются те или иные вещества в различных агрегатных

состояниях. К таким материалам относятся NaI(Tl), CsI, ZnS, антрацен ( $C_{14}H_{10}$ ), стильбен ( $C_{14}H_{12}$ ) и др. Кроме самого сцинтиллятора в состав сцинтилляционного детектора входит фотоэлектронный умножитель. Данное устройство преобразует вспышки света в электрические импульсы за счет вторичной электронной эмиссии.

Полупроводниковый метод основан на явлении поглощения ионизирующего излучения полупроводниками и последующей регистрации образованных носителей заряда. Полупроводниковые детекторы характеризуются высокой эффективностью регистрации и разрешающей способностью. Количество носителей заряда, образующихся в объеме полупроводника при поглощении ионизирующего излучения зависит только от энергии ионизирующей частицы. Поэтому зависимость амплитуды импульса от поглощенной энергии в полупроводниковых детекторах линейна для всех видов ионизирующего излучения.

Ионизационный метод основан на ионизирующем действии излучений. Ионы, возникающие в газовой среде под действием ионизирующего излучения, перемещаются к соответствующим электродам под действием электрического поля. На основе данного метода работают газоразрядные счетчики. Наполнением газоразрядных счетчиков чаще всего служит инертный газ. Для измерения альфа-излучения, характеризующегося малой проникающей способностью, в торце счетчика делают тонкое окно из слюды или нейлона [4].

Общим недостатком описанных методов служит невозможность дистанционной регистрации альфа-частиц, из-за малого пробега альфа-частиц детектор должен находиться в непосредственной близости от исследуемого объекта. Метод аэроионной регистрации ионизирующих частиц позволяет значительно увеличить дальность действия применяемой аппаратуры. За счет создания альфа-излучением высокой концентрации аэроионов в воздухе данный метод имеет высокую эффективность при дистанционной регистрации альфа-излучающих нуклидов, что делает его наиболее подходящим именно для первичной оценки наличия альфа-излучающих радионуклидов.

**История возникновения метода аэроионной регистрации ионизирующих частиц.** В 1989 г. специалисты из МИФИ предложили метод аэроионной регистрации ионизирующих частиц [5]. Исследования возможностей использования данного

метода проводились с помощью открытого цилиндрического счетчика Гейгера–Мюллера. В процессе исследований было выявлено, что открытый счетчик Гейгера–Мюллера способен не только к прямой, но и к дистанционной регистрации альфа-частиц. Недостаток такого типа регистрации заключается в низкой чувствительности при работе счетчика на расстояниях близких к пробегам альфа-частиц в воздухе в режиме «прямой» регистрации, когда частицы попадают непосредственно в рабочий объем счетчика. Учитывая, что пробег альфа-частиц в воздухе не превышает 10.6 см при энергии 10 МэВ, регистрация альфа-излучения напрямую представляется достаточно трудоемкой задачей [2]. Увеличить эффективность регистрации можно, детектируя вторичные частицы, возникающие вследствие распространения альфа-излучения в воздухе – аэроионы.

Об эффективности регистрации аэроионов в качестве показателя наличия альфа-излучающих нуклидов можно судить по исследованиям, проводившимся на территории ближней зоны Чернобыльской АЭС (ЧАЭС). Результаты измерений фильтров, через которые прокачивали воздух при проведении работ по бурению исследовательских скважин, показали, что удельная (объемная) активность альфа-аэрозолей достигала  $10^{-11}$  Ки/л, что в тысячи раз превышало предельно допустимые концентрации. Среднегодовая удельная (объемная) активность в контролируемых помещениях объекта по сумме долгоживущих бета- и гамма-излучающих радионуклидов составляет до  $3.3 \cdot 10^{-13}$  Ки/л, по альфа-излучающим радионуклидам – до  $1.4 \cdot 10^{-15}$  Ки/л [6].

В связи с повышенной концентрацией альфа-излучающих аэрозолей спустя год после аварии в зоне ЧАЭС наблюдался избыток отрицательного объемного заряда, а электропроводность воздуха была в 100 раз выше, чем в других районах. Согласно результатам исследований, концентрация аэроионов в приземном воздухе в зоне ЧАЭС в 1987 г. значительно (от 3 до 10 раз) превышала значения, допустимые для воздуха производственных и общественных помещений [7].

Итогом практики применения метода аэроионной регистрации ионизирующих частиц стало подтверждение возможности его использования для обнаружения источников ионизирующего излучения.

**Метод аэроионной регистрации ионизирующих частиц и устройства для обнаружения источников ионизирующего излучения на его основе.** При

воздействии ионизирующего излучения на молекулу или атом газа происходит образование аэроионов. В этом процессе энергия передается молекуле или атому, что приводит к удалению электрона или нескольких из атома. В результате нейтральный атом приобретает положительный заряд, а высвободившийся электрон присоединяется к другому атому, образуя отрицательный аэроион. Он может вступать во взаимодействие с другими газами и молекулами воздуха, образуя комплексы – легкие и тяжелые аэроионы, которые отличаются друг от друга подвижностью.

В настоящее время наиболее распространен метод аспирационного конденсатора [8]. Интегральный аспирационный конденсатор, схема которого представлена на рис. 1, имеет по одному входному и выходному отверстию, через которые проходит воздух, одну измерительную обкладку и одну обкладку, находящуюся под напряжением относительно заземленного экрана.

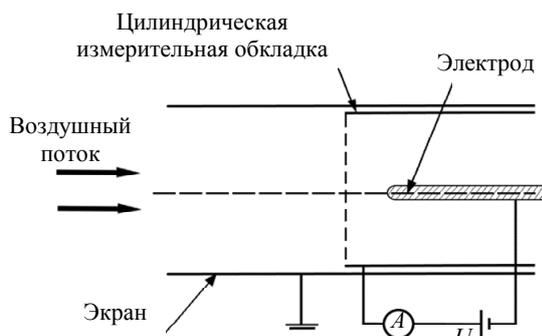


Рис. 1. Схема аспирационного конденсатора [8]  
Fig. 1. Aspiration condenser circuit layout [8]

Устройство работает следующим образом. Воздух, концентрацию ионов в котором необходимо измерить, продувается через камеру с помощью вентилятора. Электрическое поле в конденсаторе вызывает смещение аэроионов, которое приводит к их осаждению на собирающем электроде. Для определения не только объемной плотности ионов, но и их концентрации, объемный заряд легкого иона воздуха считают равным заряду электрона. Ионный ток  $I_{и}$  зависит от концентрации, подвижности аэроионов, параметров камеры и определяется выражением [9]

$$I_{и} = \int_{-\infty}^{\infty} G\rho(K)dK,$$

где  $G$  – коэффициент пропорциональности, который зависит от подвижности и параметров конденсатора;  $\rho(K)$  – плотность заряда аэроионов с подвижностью  $K$ .

В случае необходимости определения концентрации только легких аэроионов (подвижность  $0.4 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{В}^{-1}$ ) чаще всего используется интегральная аспирационная камера с «продуваемыми сетками», конструкция которой представлена на рис. 2 [9].

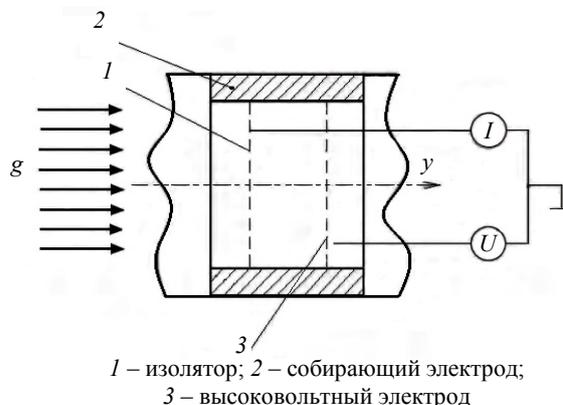


Рис. 2. Аспирационная камера с продуваемыми сетками [9]  
Fig. 2. Aspiration chamber with blowing grids [9]

В данном устройстве электроды представляют собой сетки, которые располагаются перпендикулярно потоку воздуха. При этом параметры камеры (напряжение и расстояние между обкладками) и скорость поступающего воздуха выбираются так, чтобы на электроды осаждались лишь те ионы, подвижность которых меньше или равна заданной.

Описанный метод отличается универсальностью, достаточно высокой чувствительностью в широком диапазоне энергий, а также простотой реализации и обработки результатов измерения относительно других методов.

**Сравнение устройств и измерительных комплексов для определения концентрации аэроионов воздуха.** В настоящее время активно применяются счетчики аэроионов, основанные на методе аспирационного конденсатора. Принцип работы счетчиков заключается в том, что аэроионы, отобранные из заданного объема воздуха, осаждаются на соответствующих электродах аспирационной камеры счетчика. Далее, электроды преобразуют накопленные заряды в ионный ток, пропорциональный концентрации аэроионных ионов соответствующей полярности. В статье рассмотрены следующие счетчики: УТ-8401, Сапфир-ЗК, МАС-01. Их технические характеристики представлены в табл. 1.

Согласно таблице, аспирационный счетчик аэроионов МАС-01 – наиболее компактный из представленных и обладает широким диапазоном

Табл. 1. Характеристики некоторых аспирационных счетчиков аэроионов [10]  
 Tab. 1. Characteristics of certain aspiration aeroion counters [10]

Наименование характеристики	УТ-8401 (ТГУ)	Сапфир-3К (КГТУ)	МАС-01 (МИФИ)
Диапазон измерений концентрации аэроионов, см <sup>-3</sup>	$5 \cdot 10^1 \dots 2 \cdot 10^{6*}$ $5 \cdot 10^2 \dots 10^{7*}$	$2 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^5$	$10^2 \dots 10^6$
Пределы допускаемой основной относительной погрешности, %	40...50	40...50	40...50
Подвижность измеряемых ионов, см <sup>2</sup> с <sup>-1</sup> В <sup>-1</sup>	$\geq 0.4^*$ $3.2 \cdot 10^{-4} \dots 0.4^*$	$\geq 0.4$	$\geq 0.4$
Объемный расход воздуха, л/мин	2.7...270	230	120
Габаритные размеры, мм	525 × 250 × 335	240 × 330 × 120	190 × 105 × 65
Масса, не более, кг	12	4.5	0.9
Наличие блока первичной обработки информации	Нет	Нет	Есть

\* Данные приведены для различных модификаций УТ-8401.

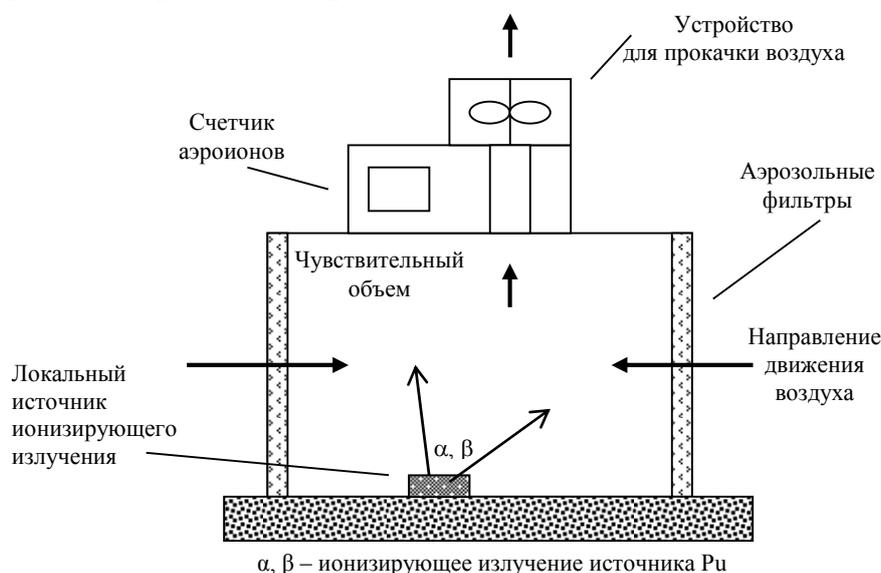


Рис. 3. Схема установки для определения загрязненности поверхности оборудования радионуклидами [11]

Fig. 3. Schematic diagram of a facility for determining radionuclide contamination of equipment surfaces [11]

измерения концентрации аэроионов. Счетчик УТ-8401 также обладает широким диапазоном измерения концентрации ионов воздуха, но его массогабаритные показатели ограничивают применение данного прибора в составе портативных устройств определения активности альфа-излучающих нуклидов.

На основе отечественного счетчика МАС-01 разработана установка, предназначенная для выявления наличия источников ионизирующего излучения от поверхностных источников. Схема установки приведена на рис. 3.

Данная установка позволяет определять наличие источников альфа-излучения на поверхности, площадью порядка  $0.1 \text{ м}^2$ , за время – порядка нескольких секунд. Когда время прохождения иона от точки образования до регистрации счетчиком значительно меньше среднего времени

жизни иона, концентрация ионов, регистрируемых рассматриваемой установкой, зависит от активности радиоактивного источника согласно формуле [11]

$$n = \frac{Ak}{vS}, \quad (*)$$

где  $n$  – концентрация ионов, регистрируемых устройством;  $A$  – число распадов единицу времени;  $k$  – эффективное число пар ионов на распад радионуклида, определяемое как  $k = E_{\alpha}/34 \text{ эВ}$ , где  $34 \text{ эВ}$  – средняя энергия образования пары ионов в воздухе;  $S$  – площадь поперечного сечения трубы;  $v \times S$  – объем воздуха, проходящий через сечение трубы в единицу времени.

На рис. 4 представлена зависимость концентрации аэроионов от активности источника альфа-излучения (Pu): полученная линейная зависи-

мость от активности подтверждает возможность использования формулы (\*) при достаточно малых временах прохождения иона от точки образования до регистрации счетчиком.

Эксперимент показал, что время жизни легких аэроионов варьируется от 3.8 до 11 с в условиях отсутствия дополнительной очистки воздуха. С целью снижения времени прохождения иона к счетчику до доли секунды могут быть использованы аэрозольные фильтры на входе воздуха в камеру. Для уменьшения влияния сопутствующего гамма-излучения стенки камеры могут быть сделаны из материала с большим зарядовым числом.

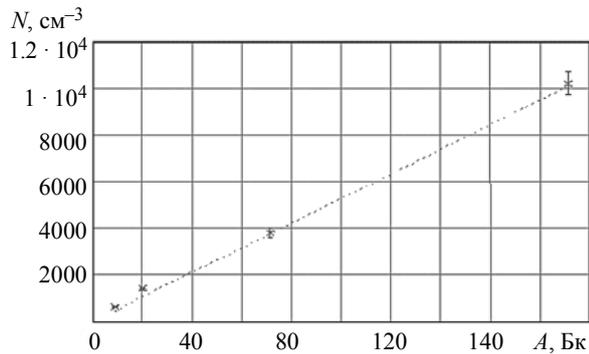


Рис. 4. Зависимость концентрации аэроионов от активности Pu  $\alpha$ -источника ( $E_{\alpha} = 5.05$  МэВ) [11]

Fig. 4. Dependence of aeroion concentration on the activity of Pu  $\alpha$ -source ( $E_{\alpha} = 5.05$  MeV) [11]

Рассмотрим примеры измерительных комплексов, основанных на методе аспирационного конденсатора.

При проведении радиометрического мониторинга используются измерительные комплексы для регистрации удельной (объемной) активности радона и торона в воздухе [12], [13]:

– современный отечественный комплекс «АЛЬФАРАД+» предназначенный для одновременной регистрации радона, торона и декомпозиционных продуктов радона. С помощью «АЛЬФАРАД+» дополнительно проводятся измерения коэффициента равновесия радона в воздухе помещений и определения содержания радона в различных средах. Внешний вид комплекса представлен на рис. 5;

– американский радиометрический комплекс «RAD 7», предназначенный для измерения объемной активности радона и торона в воздухе, представлен на рис. 6;

– немецкий радиометрический комплекс «SARAD», предназначенный для долговременного мониторинга концентрации радона, контроля объемной активности радона, влажности и температуры в помещениях, представлен на рис. 7.

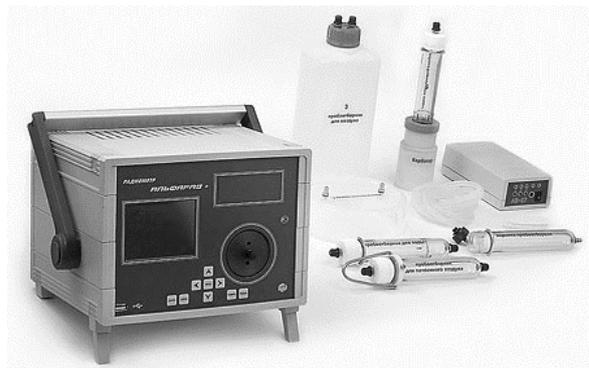


Рис. 5. Измерительный комплекс «АЛЬФАРАД+» [13]  
Fig. 5. ALFARAD+ measuring complex [13]



Рис. 6. Измерительный комплекс «RAD 7»  
Fig. 6. RAD 7 measuring complex



Рис. 7. Измерительный комплекс «SARAD»  
Fig. 7. SARAD measuring complex

Для сравнительного анализа измерительных комплексов их технические характеристики представлены в табл. 2.

Помимо уже разработанных и используемых комплексов, в России запатентовано устройство для дистанционного обнаружения источников альфа-излучения [14]. Данное устройство обеспечивает дистанционную регистрацию альфа-излучающих радионуклидов на фоне сопутствующих излучений и обеспечивает не только измерение характеристик альфа-излучающих нуклидов, но и их обнаружение.

Повышение точности определения активности источника достигается за счет сравнения скорости счета импульсов калибровочного детектора

Табл. 2. Сравнительная характеристика измерительных комплексов  
 Tab. 2. Comparison of measurement system characteristics

Характеристика	«АЛЬФАРАД+»	«SARAD»	«RAD 7»
<i>Блок измерения ОА (измерительная камера)</i>			
Объем камеры, см <sup>3</sup>	900	135	700
Собирающее напряжение, В	1300...1500	~100	2000...2500
Чувствительность, с <sup>-1</sup> · Бк <sup>-1</sup> · м <sup>3</sup>	2...1 · 10 <sup>-4</sup>	0.53...1 · 10 <sup>-4</sup>	2.2...1 · 10 <sup>-4</sup>
Корректировка чувствительности влияния влажности	Калибровка по влажности	Нет	Осушка пробы
<i>Блок регистрации и обработки</i>			
Обработка спектров в ходе измерений	Да	Нет	Да
Вывод спектров на дисплей	Да	Нет	Нет
Блок измерения ЭРОА	Да	Нет	Нет
Габариты, мм	220 × 200 × 165	255 × 140 × 235	295 × 215 × 279
Вес, кг	3.6	6.0	4.35

с заранее заданной скоростью счета, определяемой активностью калибровочного источника альфа-излучения. Таким образом достигается оптимальное рабочее напряжение на измерительном детекторе, обеспечивающее разницу между эффективностями регистрации ионов на следах частиц различной природы. Коррекция напряжения осуществляется с точностью ±3 В. С целью повышения скорости работы в устройстве реализованы два режима работы: «поиск» и «измерение». В режиме «поиск» увеличивается рабочее напряжение, что позволяет обнаруживать источники альфа-излучения на большем расстоянии; в режиме «измерение» определяется тип обнаруженного источника излучения и оценивается его активность.

Устройство содержит измерительный детектор аэроионов, блок для переноса аэроионов от исследуемой поверхности к измерительному детектору, выход которого связан с измерительным счетчиком, калибровочный детектор, сопряженный с калибровочным альфа-источником [14].

На рис. 8 представлена схема измерительного детектора, которая идентична схеме калибровочного детектора. Измерительный детектор выполнен в виде плоскопараллельного счетчика заряженных частиц с проволочным анодом, снабженный охранными электродами. Две заземленные катодные плоскости (1) выполнены из проводящего материала. Анодная проволочка (2) из нержавеющей стали расположена симметрично между катодами параллельно плоскостям. Охранные электроды (3) связаны с анодом через сопротивление утечки. Рабочее значение потенциала на аноде зависит от температуры, давления и влажности и в результате калибровки устанавливается в пределах 3900 В.

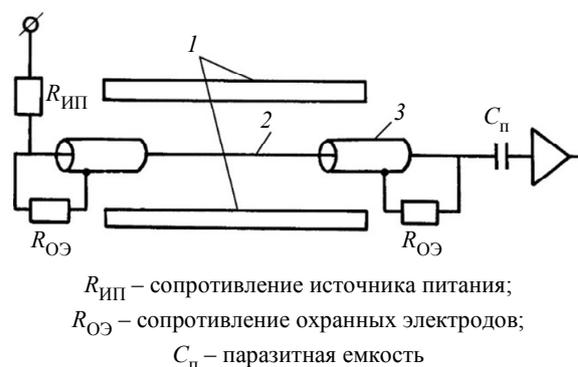


Рис. 8. Схема измерительного детектора [14]  
 Fig. 8. Detector circuit [14]

**Заключение.** В настоящее время с учетом активного обновления предприятий ядерно-топливного цикла в сфере атомной промышленности актуально увеличение эффективности производительности систем оперативной сортировки и переработки РАО. Категория РАО, определяющая дальнейшие меры по их переработке, в большой степени зависит от активности источников альфа-излучения, входящих в состав отходов. Поэтому регистрация альфа-излучения и радионуклидный анализ занимают решающее место в вопросе повышения скорости сортировки и переработки отходов.

Рассмотренный в данной статье метод аэроионной регистрации ионизирующего излучения имеет преимущества перед полупроводниковыми, сцинтилляционными и ионизационными методами за счет высокой чувствительности и возможности проведения дистанционных измерений. Реализация данного метода при разработке систем сортировки и переработки РАО позволит повысить точность и скорость обработки отходов.

В настоящее время разработаны устройства и комплексы для регистрации и проведения мониторинга альфа-излучения. Большинство из них

содержат компоненты регистрации аэроионов – счетчики аэроионов, основанные на методе аспирационного конденсатора.

Особенно перспективны устройство для дистанционного обнаружения источников альфа-

излучения с защитой от сопутствующих излучений; отечественный комплекс «АЛЬФАРАД+», предназначенный для одновременной регистрации радона, торона и декомпозиционных продуктов радона.

### Список литературы

1. Колотков Г. А. Дистанционное детектирование радиоактивных выбросов в атмосферу предприятиями ядерно-топливного цикла на частотах спонтанного излучения атомарного водорода (H) и гидроксидов (OH): автореф. дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2014. 21 с.

2. Кимель Л. Р., Машкович В. П. Защита от ионизирующих излучений: справочник. М.: Атомиздат, 1972. 312 с. 2-е изд., перераб. и доп.

3. International Atomic Energy Agency Nuclear Data Services. URL: <https://www-nds.iaea.org> (дата обращения: 01.02.2024).

4. Голубев Б. П. Дозиметрия и защита от ионизирующих излучений. М.: Атомиздат, 1976. 504 с.

5. Мирошниченко В. П., Родионов Б. У., Чепель В. Ю. Аэроионная регистрация ионизирующих частиц // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15, № 12. С. 53–54.

6. Авария на Чернобыльской АЭС: Опыт преодоления. Извлеченные уроки / А. В. Носовский, В. Н. Васильченко, А. А. Ключников, Б. С. Пристер. Киев: Техника, 2006. 264 с.

7. Смирнов В. В. Ионизация в тропосфере. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 312 с.

8. Состояние и развитие обеспечения единства измерений электрических параметров ионизированного воздуха и аэроионов / С. В. Колерский, В. И. Добровольский, П. Н. Зубков, С. С. Колерская // Альманах современной метрологии. 2016. № 1(6). С. 98–106.

9. Постнов В. В., Маковеев В. М. Аспирационный метод измерения концентрации аэроионов воздуха // Сб. межд. науч.-практ. конф. «Технические науки: прошлое, настоящее, будущее». Уфа: Аэтерна, 2014. С. 51–53.

10. Котляров А. А., Мавлютов А. А., Колерский С. В. Средства контроля уровней ионизации воздуха производственных и общественных помещений и их метрологическое обеспечение // АНРИ. 2000. № 4 (23). С. 39–42.

11. Новые приборы для решения проблем радиационного контроля при снятии АЭС с эксплуатации / А. Ю. Максимов, А. А. Носков, А. А. Афонин, А. А. Мавлютов // Сб. тр. 3-й науч.-техн. конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». Подольск: ФГУП ОКБ Гидропресс. 2003. 130 с.

12. Афонин А. А. Методы определения изотопов радона и их реализация в измерительном комплексе, использующая электроосаждение дочерних продуктов, для оценки факторов радиационной опасности: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2013. 28 с.

13. Свид. об утверждении типа средств измерений RU.C.38.002.A № 45439 / А. А. Котляров ООО «НТМ-Защита». Оpubл. 08.02.2012 г. 6 с.

14. Пат. 2158009 (RU) МПКG01 T 1/167. Устройство для дистанционного обнаружения источника альфа-излучения / В. П. Мирошниченко, Е. М. Онищенко, Б. У. Родионов, А. Б. Симакон, А. В. Шальнов. Заявл. 30.12.1999; опубл. 20.10.2000. 8 с.

### Информация об авторах

**Юлия Юрьевна Бунькова** – студентка гр. 9207 факультета электроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ»; инженер ФГАНУ «ЦНИИ робототехники и технической кибернетики», 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий проспект, д. 21.

E-mail: [yu.bunkova@rtc.ru](mailto:yu.bunkova@rtc.ru)

**Ольга Валерьевна Вольпяс** – студентка гр. 9371 факультета компьютерных технологий и информатики СПбГЭТУ «ЛЭТИ»; программист ФГАНУ «ЦНИИ робототехники и технической кибернетики», 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий проспект, д. 21.

E-mail: [o.volpyas@rtc.ru](mailto:o.volpyas@rtc.ru)

### References

1. Kolotkov G. A. Distancionnoe detektirovanie radioaktivnyh vybrosov v atmosferu predpriyatijami jaderno-toplivnogo cikla na chastotah spontannogo izluchenija atomarnogo vodoroda (N) i gidroksila (OH): avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk. Tomsk, 2014. 21 s. (In Russ.).

2. Kimel' L. R., Mashkovich V. P. Zashhita ot ionizirujushhij izluchenij: spravochnik. M.: Atomizdat, 1972. 312 s. 2-e izd., pererab. i dop. (In Russ.).

3. International Atomic Energy Agency Nuclear Data Services. URL: <https://www-nds.iaea.org> (data obrashhenija: 01.02.2024).

4. Golubev B. P. Dozimetrija i zashhita ot ionizirujushhij izluchenij. M.: Atomizdat, 1976. 504 s. (In Russ.).

5. Miroshnichenko V. P., Rodionov B. U., Chepel' V. Ju. Ajerioonnaja registracija ionizujushhij chastic // Pis'ma v ZhTF. 1989. T. 15, № 12. S. 53–54. (In Russ.).

6. Avarija na Chernobyl'skoj AJeS: Opyt preodolenija. Izvlechenye uroki / A. V. Nosovskij, V. N. Vasil'chenko, A. A. Kljuchnikov, B. S. Prister. Kiev: Tehnika, 2006. 264 s. (In Russ.).

7. Smirnov V. V. Ionizacija v troposfere. SPb.: Gidrometeoizdat, 1992. 312 s. (In Russ.).

8. Sostojanie i razvitie obespechenija edinstva izmenenij jelektricheskikh parametrov ionizirovannogo vozduha i ajeroionov / S. V. Kolerskij, V. I. Dobrovol'skij, P. N. Zubkov, S. S. Kolerskaja // Al'manah sovremennoj metrologii. 2016. № 1(6). S. 98–106. (In Russ.).

9. Postnov V. V., Makoveev V. M. Aspiracionnyj metod izmerenija koncentracii ajeroionov vozduha // Sb. mezhd. nauch.-prakt. konf. «Tehnicheskie nauki: proshloe, nastojashhee, budushhee». Ufa: Ajeterna, 2014. S. 51–53. (In Russ.).

10. Kotljarov A. A., Mavljutov A. A., Kolerskij S. V. Sredstva kontrolja urovnej ionizacii vozduha proizvodstvennyh i obshhestvennyh pomeshhenij i ih metrology-cheskoe obespechenie // ANRI. 2000. № 4 (23). S. 39–42. (In Russ.).

11. Novye pribory dlja reshenija problem radiacionnogo kontrolja pri snjatii AJeS s jekspluatacii / A. Ju. Maksimov, A. A. Noskov, A. A. Afonin, A. A. Mavljutov // Sb. tr. 3-j nauch.-tehn. konf. «Obespechenie bezopasnosti AJeS s VVJeR». Podol'sk: FGUP OKB Gidropress. 2003. 130 s. (In Russ.).

12. Afonin A. A. Metody opredelenija izotopov rado-na i ih realizacija v izmeritel'nom komplekse, ispol'zujushhaja jelektoosazhdenie dochernih produktov, dlja ocenki faktorov radiacionnoj opasnosti: avtoref. dis. ... kand. fiz.-mat. nauk. M., 2013. 28 s. (In Russ.).

13. Svid. ob utverzhenii tipa sredstv izmerenij RU.C.38.002.A № 45439 / A. A. Kotljarov OOO «NTM-Zashhita». Opubl. 08.02.2012 g. 6 s. (In Russ.).

14. Pat. 2158009 (RU) MPKG01 T 1/167. Ustrojstvo dlja distancionnogo obnaruzhenija istochnika al'fa-izluchenija / V. P. Miroshnichenko, E. M. Onishhenko, B. U. Rodionov, A. B. Simakov, A. V. Shal'nov. Zajavl. 30.12.1999; opubl. 20.10.2000. 8 s. (In Russ.).

#### Information about the authors

**Yuliya Yu. Bunkova** – student gr. 9207 of the Faculty of Electronics, Saint Petersburg Electrotechnical University; engineer, Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics. 21, Tikhoretsky prospect, Saint Petersburg, 194064, Russia.  
E-mail: yu.bunkova@rtc.ru

**Olga V. Volpyas** – student gr. 9371 of the Faculty of Computer Technology and Informatics of Saint Petersburg Electrotechnical University; programmer, Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics. 21, Tikhoretsky prospect, Saint Petersburg, 194064, Russia.  
E-mail: o.volpyas@rtc.ru

Статья поступила в редакцию 26.04.2024; принята к публикации после рецензирования 05.06.2024; опубликована онлайн 24.10.2024.

Submitted 26.04.2024; accepted 05.06.2024; published online 24.10.2024.