

# ПРИМЕНЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО И РОБОТИЗИРОВАННОГО ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОЦЕНКИ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ

*O. B. Нагих<sup>a, 1</sup>, A. I. Маджидов<sup>a, 2</sup>, B. M. Грачев<sup>a</sup>, A. E. Шустов<sup>a</sup>,  
З. М. Утешев<sup>a</sup>, К. Ф. Власик<sup>a</sup>, С. Е. Улин<sup>a</sup>, И. А. Южаков<sup>a</sup>,  
E. И. Ольшевский<sup>a</sup>*

<sup>a</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, 115409, Россия

Представлены конструкция и функции автоматизированного и роботизированного гамма-спектрометрического комплекса, разработанного в НИЯУ МИФИ. Основой комплекса является ксеноновый гамма-детектор, обладающий высокими спектрометрическими и эксплуатационными характеристиками. Опыт работы с комплексом продемонстрировал необходимость визуализации данных, получаемых от источников радиоактивного излучения. По этой причине было начато создание вспомогательной индикаторной системы для определения уровня гамма-излучения на основе интенсивности потоков, а в дальнейшем и локализации радионуклидов.

This article presents the design and functions of the automated and robotic gamma-ray spectrometric complex developed at NRNU MEPhI. The basis of the complex is a xenon gamma-ray detector with high spectrometric and operational characteristics. Experience with the complex demonstrated the need for visualization of data obtained from radioactive radiation sources. For this reason, the creation of an indicator system was started for determining the level of gamma radiation based on the intensity of flows, and, subsequently, the localization of radionuclides.

PACS: 07.85.Nc

## ВВЕДЕНИЕ

При работе с ядерно-физическими установками и выводе их из эксплуатации приходится иметь дело с радиоактивными материалами и отходами, создающими большие потоки ионизирующих излучений. С целью обнаружения и регистрации этих потоков, а также идентификации радиоактивных источников в НИЯУ МИФИ разработан автоматизированный и роботизированный гамма-спектрометрический комплекс (АРГСК) [1]. Разработка вспомогательной индикаторной системы для определения уровня гамма-излучения на основе интенсивности потоков и ее применение позволит значительно повысить точность обнаружения источников и измерения интенсивности потоков.

---

<sup>1</sup>E-mail: nagikh\_ole4ka@mail.ru

<sup>2</sup>E-mail: AIMadzhidov@mephi.ru

## КОНСТРУКЦИЯ ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТА

Создание мобильных гамма-спектрометрических комплексов — сложный процесс, включающий разработку специализированного оборудования, программного обеспечения и систем защиты. Основными составными компонентами АРГСК (рис. 1) являются: ксеноновый гамма-спектрометр (КГС), мобильная платформа WHEELTEC Ackerman ROS, блок электроники для управления гамма-комплексом, видеокамера и лидар. Компоненты установки компактные и легкие для транспортировки. Суммарный вес комплекса — 40 кг. Предусмотрена возможность работы от автономных источников питания. Управление комплексом осуществляется с помощью пульта дистанционного управления или клавиатуры. АРГСК устойчив к вибрациям и не подвержен воздействию внешних шумов.



Рис. 1. Внешний вид АРГСК

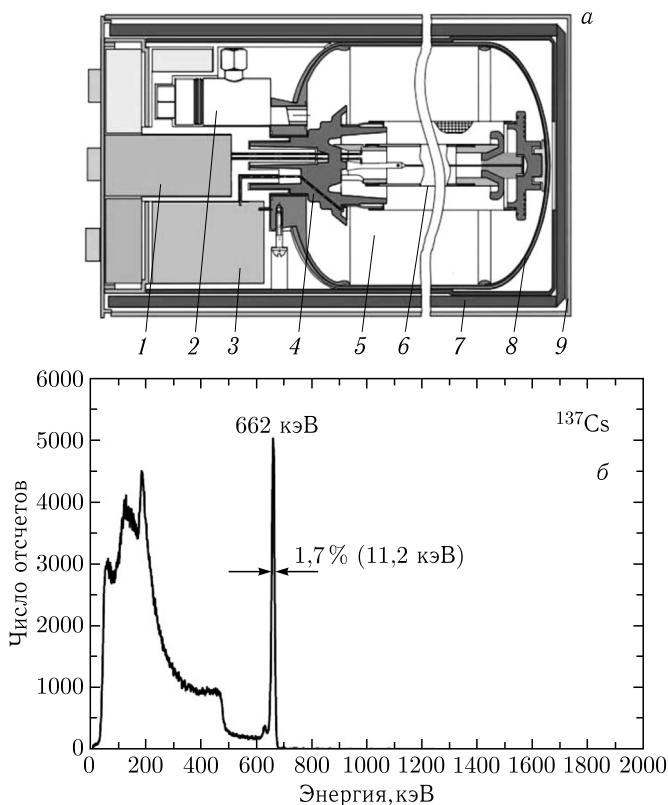
Конструкция комплекса позволяет ему быть мобильным и проводить гамма-спектрометрию даже в труднодоступных местах.

## КСЕНОНОВЫЙ ГАММА-СПЕКТРОМЕТР

Гамма-спектрометры на основе сжатого ксенона обладают хорошими спектрометрическими и эксплуатационными характеристиками, что позволяет им быть эффективными детектирующими устройствами (табл. 1). КГС объемом 2 л заполнен смесью ксенона с молекулярным водородом в количестве 0,2% для увеличения скорости дрейфа электронов. При такой концентрации смеси достигаются наилучшее энергетическое разрешение и высокое быстродействие. Ксенон выбран в качестве рабочего вещества благодаря его свойствам: он химически инертен, имеет большое сечение взаимодействия ( $Z = 54$ ), вследствие чего достигается высокая эффективность детектора; естественная смесь ксенона состоит из стабильных изотопов, т. е. газ не радиоактивен. Устройство КГС: 1 — зарядочувствительный усилитель; 2 — газовый кран; 3 — высоковольтный источник питания; 4 — гермоввод; 5 — ионизационная камера; 6 — экранирующая сетка; 7 — тефлоновая изоляция; 8 — стальной корпус с композитным покрытием (кевлар); 9 — защитный кожух [2, 3] (рис. 2, а).

Таблица 1. Основные характеристики КГС

Параметр	Значение
Напряжение питания, В	$\pm 24$
Энергопотребление, Вт	20
Габариты, см	$\varnothing 15 \times 45$
Масса, кг	5
Рабочий объем, см <sup>3</sup>	2000
Эффективность регистрации $\gamma$ -квантов с энергией 662 кэВ на расстоянии источник–детектор 25 см без учета телесного угла, %	2
Энергетическое разрешение для энергии $\gamma$ -квантов 662 кэВ, %	$1,7 \pm 0,3$
Диапазон измеряемых энергий гамма-квантов, МэВ	0,05–5,00
Плотность ксенона, г/см <sup>3</sup>	0,3

Рис. 2. Структура КГС (а) и энергетический спектр  $^{137}\text{Cs}$  (б)

С помощью КГС потоки излучения регистрируются и анализируются для получения энергетических спектров гамма-излучения различных радиоактивных источников. В качестве примера показан энергетический спектр  $^{137}\text{Cs}$ , зарегистрированный КГС (рис. 2, б).

## РАЗРАБОТКА ИНДИКАТОРНОЙ СИСТЕМЫ

Задача определения местоположения источников ионизирующего излучения значительно упрощается при применении вспомогательных систем и методов визуализации излучения. Принцип работы разрабатываемой системы заключается в приеме аналоговых сигналов (импульсов), зарегистрированных с КГС. В качестве системы сбора данных и управления светодиодной подсветкой был выбран микрокомпьютер Raspberry Pi model 3 B+, который позволяет генерировать ШИМ-сигналы [4]. ШИМ-сигнал представляет собой последовательность импульсов с постоянной частотой следования и управляемым коэффициентом заполнения (рис. 3). Изменяя коэффициент

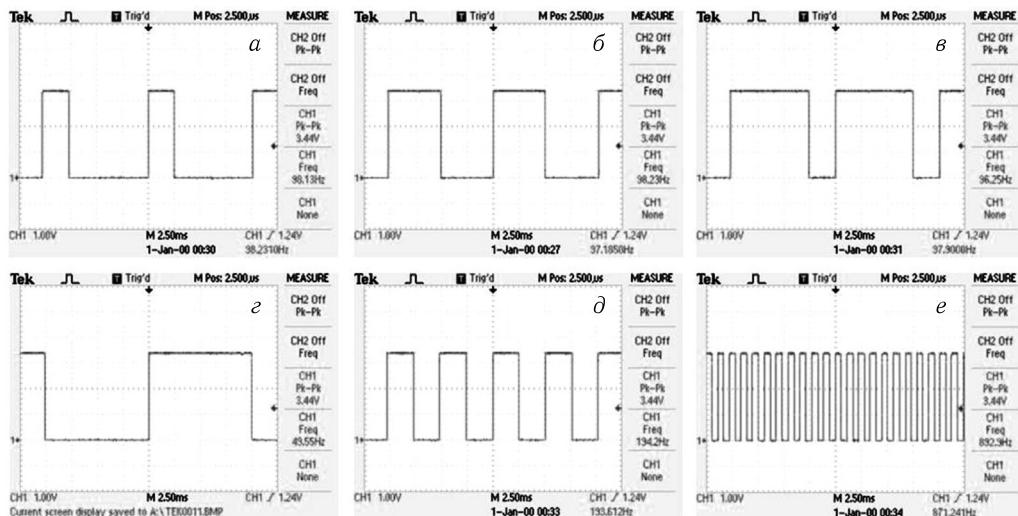


Рис. 3. Сигналы ШИМ с частотой 100 Гц для разных значений  $D$  — коэффициента заполнения ( $a = 25\%$ ,  $b = 50\%$ ,  $c = 75\%$ ), ШИМ-сигнал импульсов различных частот ( $d = 50$  Гц,  $e = 200$  Гц,  $f = 1000$  Гц) с коэффициентом заполнения 50 %

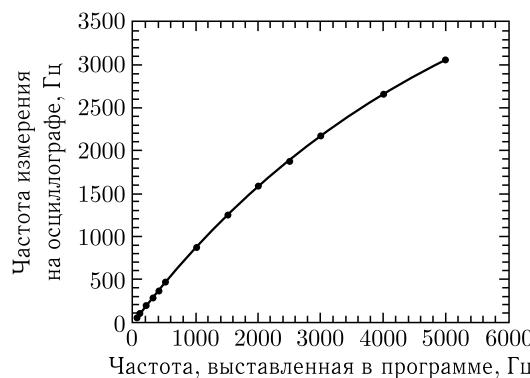


Рис. 4. График зависимости реальной частоты, измеренной на осциллографе, от частоты, выставленной в программе

заполнения ШИМ-сигнала, можно регулировать интенсивность излучения (яркость свечения) светодиодов (см. рис. 3) [5].

Частота сигнала ШИМ задается программой Raspberry Pi.

В эксперименте обнаружено, что частота реального выходного сигнала, измеряемого при помощи осциллографа, отличается от значений, выставленных в программе. Зависимость ШИМ показана на рис. 4 для разных частот, отображаемых осциллографом.

## ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

В гамма-спектрометре работает встроенное программное обеспечение (ПО), которое производит набор и передачу данных с детектора на микрокомпьютер Raspberry Pi.

Программное обеспечение компьютера позволяет определять уровень превышения фона, сохранять энергетические гамма-спектры, строить график зависимости интенсивности излучения от времени, выводить изображения с видеокамеры. В отдельном окне отображается текущий энергетический спектр гамма-излучения, который обрабатывается для определения изотопного состава и активности источника излучения (табл. 2).

ПО сравнивает текущую интенсивность с фоновым значением и контролирует параметры светодиодов с помощью ШИМ для сигнализации о превышении порога.

**Таблица 2. Минимальная детектируемая активность (МДА) для КГС объемом 2 л на расстоянии 50 см для времени набора в течение 600 с**

Изотоп	Энергия гамма-квантов, кэВ	МДА, кБк
$^{137}\text{Cs}$	662	$6,53 \pm 0,08$
$^{60}\text{Co}$	1174	$13,6 \pm 0,2$
$^{60}\text{Co}$	1332	$13,0 \pm 0,3$

## ПРОВЕРКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ СИСТЕМЫ

После успешной генерации ШИМ-сигнала необходимо перейти к усложнению программы, которая будет отвечать за параметры свечения светодиодов, настраивая их на определенные цвета и яркость. Например, при низких уровнях радиации светодиоды будут светиться зеленым цветом средней яркости, а при повышенных уровнях радиации (при превышении заданного порогового значения, равного 350 имп./с) включается красная мигающая сигнальная подсветка и увеличивается яркость для привлечения внимания.

Для обеспечения комфортной и быстрой работы любого пользователя было создано мини-приложение. Написанная программа имеет ряд настроек: регулируется цвет и яркость горения светодиодной ленты, длительность сигнала; отображается текущий темп счета.

С помощью осциллографа была проведена проверка работоспособности срабатывания системы при приближении радиоактивного гамма-источника  $^{137}\text{Cs}$  к ксеноновому гамма-спектрометру (рис. 5). В нашем примере было задействовано два порта GPIO PWM Raspberry Pi. Программа принимала количество импульсов от КГС и выдавала в параллельном режиме сигнал на пуск канала осциллографа с определенным

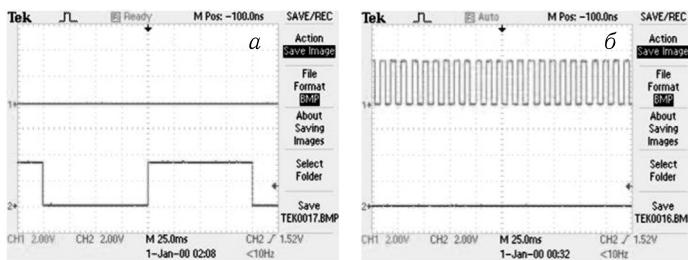


Рис. 5. Изменение ШИМ-сигнала при поднесении радиоактивного источника  $^{137}\text{Cs}$  к КГС (а — при значении темпа счета, не превышающем порог, б — при превышении порога)

ШИМ-сигналом и на порты GPIO. В программе значение темпа счета автоматически сравнивалось с заданным порогом.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный АРГСК предназначен для обнаружения и идентификации радиоактивных источников. В дополнение была разработана система оповещения превышения радиационного фона на основе светодиодной ленты, управляемой ШИМ-сигналами. Микрокомпьютер Raspberry Pi анализирует гамма-спектры, измеряемые КГС, и определяет интенсивность гамма-квантов. В случае превышения фона Raspberry Pi изменяет параметры свечения светодиодов. Так как экспериментальная установка находится на стадии разработки, вопросы о защите блоков электроники от радиации пока не рассматриваются.

**Благодарности.** Данная работа была выполнена при поддержке Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Madzhidov A. I., Dmitrenko V. V. et al. An Automated and Robotic Complex Based on a Xenon Gamma-Ray Spectrometer for Performing Tasks for Decommissioning Nuclear and Radiation Hazardous Facilities and Monitoring the Development of Radioactive Waste // J. Phys.: Conf. Ser. 2023. V. 2642, No. 1. P. 012011; doi: 10.1088/1742-6596/2642/1/012011.
2. Маджидов А. И., Дмитренко В. В. и др. Перспективы использования ксенонового гамма-спектрометра в качестве регистрирующего устройства на борту автоматизированного и роботизированного гамма-спектрометрического комплекса для вывода из эксплуатации ядерно-физических установок // Радиоактив. отходы. 2022. № 2(19). С. 56–67; doi: 10.25283/2587-9707-2022-2-56-67.
3. Yujakov I. A., Madzhidov A. I., Dmitrenko V. V. et al. Investigation of the Capabilities of a Xenon Gamma-Ray Spectrometer to Assess the Activity of an Isotope  $^{60}\text{Co}$  // Phys. Part. Nucl. Lett. 2024. V. 21. P. 739–742; doi: 10.1134/S154747712470122X.
4. Raspberry Pi Documentation. <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/raspberry-pi.html>.
5. Raspberry Pi. PWM. PWM Signal Generation. <https://microtechnics.ru/raspberry-pi-pwm-generaciya-shim-signalov>.

Получено 7 апреля 2025 г.