DOI: 10.25283/2587-9707-2022-2-56-67 УДК 539.16.07

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КСЕНОНОВОГО ГАММА-СПЕКТРОМЕТРА В КАЧЕСТВЕ РЕГИСТРИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА НА БОРТУ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО И РОБОТИЗИРОВАННОГО ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ВЫВОДА ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

А. И. Маджидов, В. В. Дмитренко, С. Е. Улин, В. М. Грачев, К. Ф. Власик, Р. Р. Егоров, К. В. Кривова, З. М. Утешев, И. В. Чернышева, А. Е. Шустов

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

Статья поступила в редакцию 26 апреля 2022 г.

Рассмотрена структура роботизированных гамма-спектрометрических комплексов, используемых при выводе ядерных объектов из эксплуатации. Представлены физико-технические характеристики ксенонового гамма-спектрометра, являющегося основным прибором для измерения спектров гамма-излучения анализируемых объектов и определения их активности. Показана целесообразность их использования при выводе ядерных объектов из эксплуатации. Дистанционно получаемая информация с гамма-спектрометрического комплекса передается по интернету на удаленный компьютер для обработки экспериментальных данных в режиме реального времени.

Ключевые слова: *гамма-излучение, энергетический спектр, ксенон, нуклид, ядерный объект, радиоактивные отходы.*

Введение

Использование эффективных, удобных и безопасных специальных измерительных приборов при выводе из эксплуатации ядерно-физических установок все еще остается актуальным. Данная статья посвящена разработке автоматизированного и роботизированного гамма-спектрометрического комплекса (АРГСК) с использованием ксенонового гамма-спектрометра (КГС) для обследования ядерно-физических установок при выводе их из эксплуатации. Такие спектрометры уже с успехом использовались для экологического гамма-мониторинга различных объектов, в установках таможенного контроля, регистрации космических гамма-вспышек (с высоким энергетическим разрешением и большой светосилой).

Для обеспечения безопасности персонала в зонах экстремального облучения и в процессе работы с загрязненными материалами целесообразно использовать автоматизированные и роботизированные комплексы, которые уже разработаны и прошли апробацию на практике.

Обзор реализованных комплексов

Рассмотрим несколько примеров роботизированных систем, разработанных и используемых для контроля, ликвидации последствий ядерных аварий и при выводе из эксплуатации ядерно-физических установок.

В середине 90-х годов персонал атомной станции Nine Mile Point опробовал и оценил мобильные роботизированные устройства, которые представлялись оптимальными с точки зрения стоимости и безопасности для перспективного проекта по определению характеристик радиоактивных отходов, начавшегося несколькими месяцами ранее [1].

Первый такой робот SURVEYOR (рис. 1) представлял собой двухколейную гусеничную платформу с возможностью подъема по лестнице под углом 45°, преодоления водных преград глубиной до 15 см и препятствий высотой до 23 см [2].

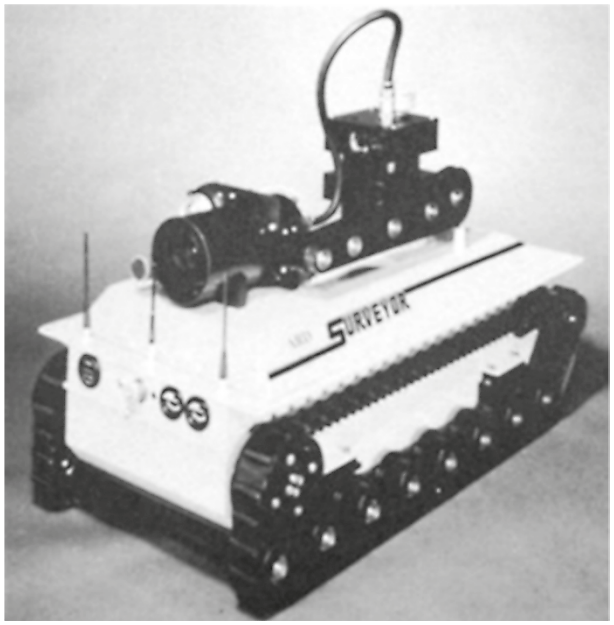

Рис. 1. Робот SURVEYOR, 1985 год

При анализе последствий разрушения четвертого блока Чернобыльской АЭС на основании состояния рассматриваемых объектов был составлен план ремонта и проведена оценка потребностей в потенциально полезных роботизированных системах [3]. Работы, как правило, классифицировались как характеризация материалов, имеющих радиоактивное загрязнение, земляные работы, демонтаж оборудования с помощью манипуляторов.

Что касается характеризации, то идея заключалась в том, чтобы использовать уже доказавшие свою работоспособность в опасных средах системы с образцами роботов, в частности с мобильной автоматизированной системой MACS (Mobile Automation Characterisation System) и удаленной характеризации — RCS (Remote Characterisation System), разработанными министерством энергетики США, и NOMAD (созданной НАСА). MACS был оборудован шестью сцинтилляционными детекторами NaI, лазерной навигацией и возможностью автоматической съемки, в то время как робот RCS мог выполнять подповерхностное картографирование, но его навигационная система на основе GPS позволяла проводить только внешние операции. Система NOMAD способна автоматически избегать препятствий и обеспечивать высокое качество изображения.

Робот Pioneer 1 (рис. 2) был разработан для оценки структурной целостности саркофага на Чернобыльской АЭС и создания трехмерной карты объекта. Чтобы противостоять высоким уровням излучения, некоторые из его основных элементов были выведены за пределы зоны действия, в то время как бортовые компоненты обычно были защищены тонким свинцом (например, 1,25 см) [4—6].

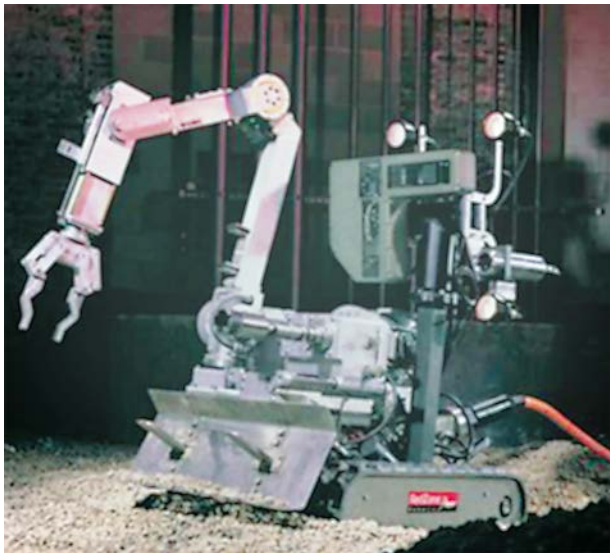

Рис. 2. Pioneer 1 — роботизированная система зондирования четвертого блока Чернобыльской АЭС

11 марта 2011 года атомная электростанция «Фукусима-1» была подвержена разрушению в результате крупного землетрясения и цунами в восточной Японии. Три реакторных здания были серьезно повреждены, и произошел выброс радиоактивных материалов. Не было известно, безопасно ли входить в здания или нет, поэтому были необходимы радиационные исследования с применением роботизированного

оборудования. Сразу после катастрофы был запущен ряд проектов по модернизации существующих роботизированных систем для работы в реакторных зданиях. В проектах участвовала Токийская электроэнергетическая компания (Tokyo Electric Power Company, TEPCO).

Первый робот Quince1 (рис. 3) был развернут на площадке 20 июля 2011 года и использовался вплоть до 20 октября 2011 года [7]. За этот период было выполнено шесть миссий, позволивших определить состояние объектов и трубопроводов АЭС, что способствовало планированию и проведению восстановительных работ. Однако 20 октября робот Quince1 не вернулся после миссии наблюдения в здании второго энергоблока реактора. На обратном пути был поврежден кабель связи, и робот был оставлен на 3-м этаже.

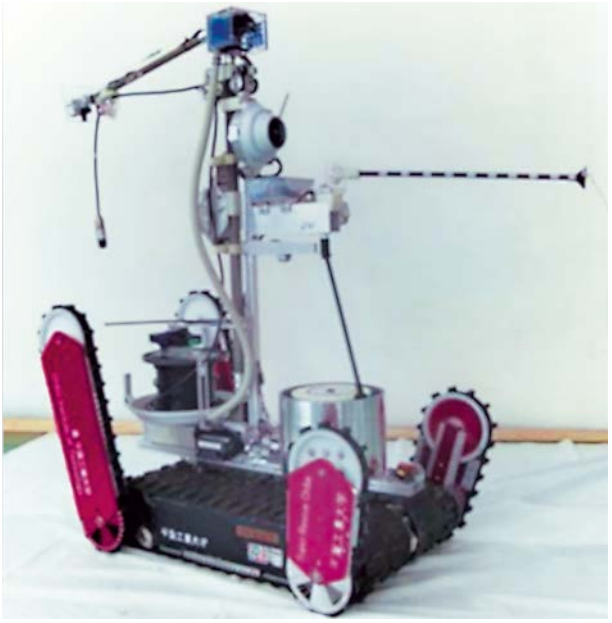

Рис. 3. Робот Quince1

Мобильный робот, оборудованный сцинтилляционным детектором для мониторинга области гамма-излучения, описан в работе [8]. Кроме того, система обеспечивает полный поворот на 180° для формирования профилей направленности излучения. Задача этой установки — определить расположение близлежащих источников гамма-излучения. В качестве шасси используется блок Lynxmotion 4, на котором установлена вращающаяся платформа. Детектор на основе бромида лантана ($LaBr_3$) просматривается фотоумножителем Hamamatsu R6231, а контроллер представляет собой плату Lynxmotion Bot II с процессором BasicAtom Pro 28.

На рис. 4 изображен робот RESCUER, предназначенный для обнаружения радиоактивных материалов и отбора проб [9]. Важной особенностью применения роботизированных систем является создание методов дезактивации робота после его использования, чтобы минимизировать любой риск радиационного воздействия на оператора и персонал. Это достигается за счет нанесения дополнительного покрытия на поверхности корпуса робота для ускорения и оптимизации процедуры дезактивации. Он обладает мультисенсорной системой, обеспечивает картирование территории и оснащен интерфейсом для полуавтономного режима работы. Конструкция корпуса выполнена из поликарбоната и нержавеющей стали AISI 304 BA (Fe/Cr18/Ni10).

Навигация этого робота обеспечивается устройством ручного кодирования и дифференциальной системой глобального позиционирования, его передвижение осуществляется с помощью колес или гусениц. Для отбора проб предусмотрены специальные захватывающие устройства и контейнер.

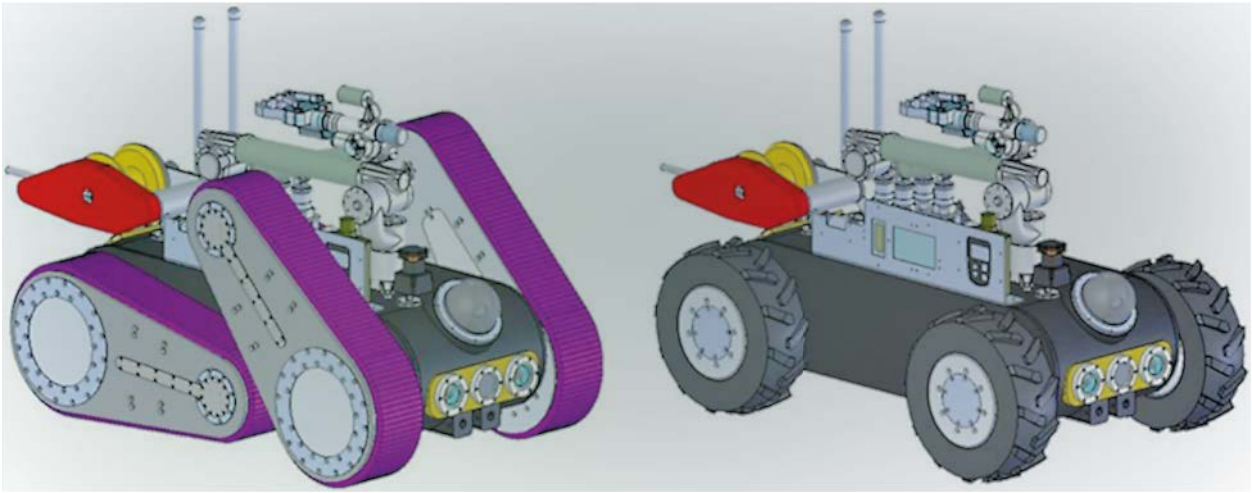

Рис. 4. Робот RESCUER на гусеничной и колесной основе

Рис. 5. Роботизированная платформа RICA с гамма-камерой (слева) и манипулятором (справа)

Новый робот RICA, предназначенный для характеризации РАО, представлен в работе [10]. Его масса 80 кг, размеры — 570 × 430 × 330 мм. Он используется для определения местоположения радиоактивных источников и измерения их активности. Робот перемещается с помощью платформы с полимерными гусеницами, на которой установлены две ПЗС-камеры переднего и заднего вида, а также белые фары на основе светодиодов для обеспечения освещения. В зависимости от цели использования, робот может комплектоваться различными наборами инструментов, например механической рукой для отбора проб и гамма-спектрометром для их характеризации (рис. 5).

Гамма-спектрометр изготовлен на основе кристалла CdZnTe и регистрирует гамма-кванты в энергетическом диапазоне 50 кэВ — 2 МэВ. Электропитание робота и управление им осуществляются через один 100-метровый коаксиальный кабель.

В 2012 году на АЭС «Фукусима-1» использовались роботы фирмы JAEA: Brokk-40 (JAEA-1), два RESQ-A (JAEA-2/3), а также усовершенствованный JAEA-3 (рис. 6) для проведения гамма-визуализации на различных этажах здания второго энергоблока через шесть месяцев после аварии.

Роботы PMORPH (с возможностью изменения формы) и SCORPION были разработаны для прохода через трубопровод диаметром 100 мм, который обеспечивал доступ к внутреннему пространству первичной защитной оболочки ядерного реактора первого блока АЭС «Фукусима-1». SCORPION был последним роботом, с помощью которого была предпринята попытка исследовать внутреннюю часть реактора второго блока.

Рис. 6. Робот JAEA-3 с системой гамма-визуализации

Роботы PMORPH и SCORPION показаны на рис. 7 (представлены на веб-сайте TEPCO) [12].

Большое количество разработанных роботизированных систем [13] позволяет сделать выбор оптимального инженерного решения для успешного выполнения поставленной задачи по мониторингу и характеризации радиоактивных загрязнений окружающей среды в результате аварий на АЭС, в том числе с использованием новых детектирующих и спектрометрических систем.

Летом 2018 года гамма-спектрометрическая система «Гамма-Пионер», разработанная специалистами НИЦ «Курчатовский институт» и установленная на роботе Брокк-90, использовалась для поиска и характеризации высокоактивных отходов (~ $3{,}17 \cdot 10^{12}$ Бк), размещенных в хранилищах. В качестве регистрирующей установки был задействован гамма-спектрометр на основе

Рис. 7. Робот серии PMORPH, используемый внутри ядерного реактора первого блока АЭС «Фукусима-1» (слева), и исследовательский мобильный робот для мониторинга радиоактивных утечек (справа)

CdZnTe [14]. Данная система может быть эффективно применена для исследования объектов в условиях высоких уровней радиоактивного загрязнения, что необходимо во время критичных аварийных работ в хранилищах высокоактивных ядерных отходов и ОЯТ, а также при выводе из эксплуатации ядерных объектов.

В настоящей статье дается описание нового автоматизированного и роботизированного комплекса на основе ксенонового гамма-спектрометра, разрабатываемого в НИЯУ МИФИ, который может использоваться при выводе из эксплуатации радиационно опасных объектов и обращении с радиоактивными отходами.

Ксеноновый гамма-спектрометр

Для роботизированных комплексов наземного базирования в качестве детектирующего устройства планируется использовать ксеноновый гамма-спектрометр с рабочим объемом 2000 см^3.

Основой КГС является импульсная ионизационная камера с экранирующей сеткой, наполненная смесью ксенона ^{54}Xe и водорода 0,2 % под давлением 40 атм. На рис. 8 представлены принципиальная схема и фотография КГС с чувствительным объемом 2000 см^3, а в таблице — его физико-технические характеристики.

Основные физико-технические характеристики КГС

Напряжение питания, В	24
Энергопотребление, Вт	20
Габариты, см	Ø15 × 45
Масса, кг	5
Рабочий объем, см^3	2000
Эффективность регистрации гамма-квантов с энергией 662 кэВ, %	6
Энергетическое разрешение для энергии гамма-квантов 662 кэВ, %	1,7 ± 0,3
Диапазон измеряемых энергий гамма-квантов, МэВ	0,05 – 5
Плотность рабочего вещества (ксенона), г/см^3	0,3

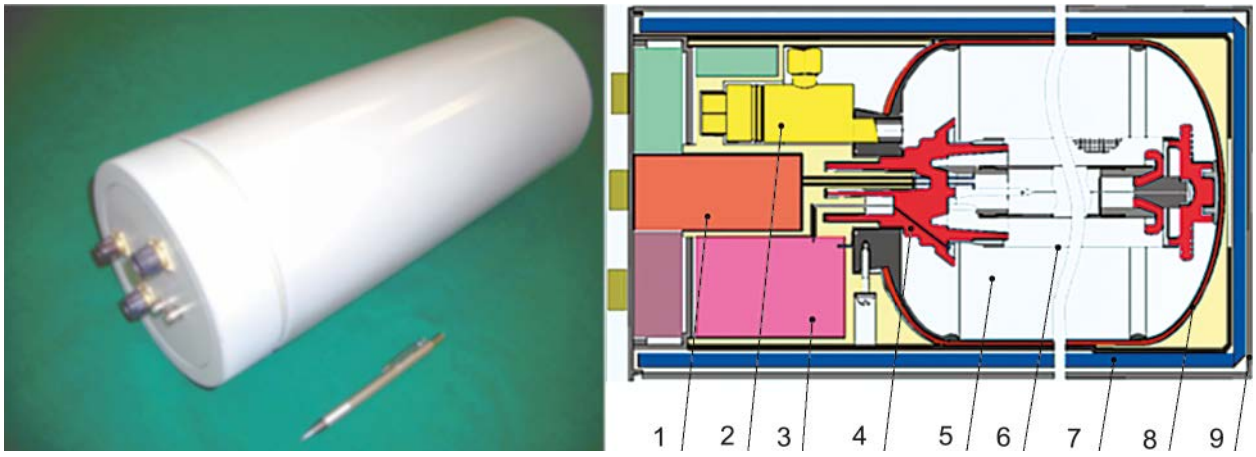

Рис. 8. Фотография и схема КГС: 1 — зарядочувствительный усилитель, 2 — кран для наполнения рабочим веществом, 3 — источник питания, 4 — керамический гермоввод, 5 — ионизационная камера, 6 — экранирующая сетка, 7 — тефлоновая изоляция, 8 — стальной корпус с композитным покрытием, 9 — внешний защитный корпус

Ключевыми преимуществами разрабатываемого комплекса являются:

- виброакустическая стабильность. Ксеноновый гамма-спектрометр способен работать в условиях виброакустических воздействий до 100 дБ без ухудшения энергетического разрешения [15];
- температурная стабильность. Основой КГС является ионизационная камера, которая способна работать при температурах до 100 °С без изменения спектрометрических характеристик прибора [16];
- радиационная стойкость. Спектрометрические характеристики КГС не ухудшаются при прохождении через детектор флюенса нейтронов $1{,}5 \cdot 10^{10}$ частиц [17].

Стабильность спектрометрических характеристик ксенонового гамма-спектрометра подтверждена 10-летним опытом эксплуатации на орбитальной станции «МИР» [18—20].

Гамма-спектрометры на основе сжатого ксенона применялись в составе опытного образца комплекса по сортировке и характеризации радиоактивных отходов [21], портального комплекса для контроля пассажиропотока [22], а также в автоматизированной системе контроля газообразных радиоактивных выбросов ядерного реактора [23]. Для обработки аналоговых сигналов КГС используется блок цифровой электроники на основе программируемых логических интегральных схем [24], которые работают с учетом его особенностей. Ксеноновый гамма-спектрометр защищен патентом (RU109300 заявка от 06.06.2011 г. [25]) и компетенциями коллектива лаборатории.

Основным преимуществом КГС является хорошее энергетическое разрешение (1,7 ± 0,3) % на линии 662 кэВ радионуклида ^{137}Cs [26]. Это в несколько раз лучше, чем у сцинтилляционных детекторов NaI и CsI, энергетическое разрешение которых составляет 7—9 % для гамма-квантов с энергией 662 кэВ.

Для работы КГС не требуется охлаждение в отличие от полупроводниковых спектрометров на основе сверхчистого германия, которым для этого необходим жидкий азот.

КГС в зависимости от условий эксплуатации изготавливаются различными объемами: от 20 до 6 000 см^3 [27—29].

Представленные разработки российских и зарубежных компаний демонстрируют общий уровень развития науки и техники в области мобильных робототехнических комплексов различного назначения и должны иметь следующие характеристики:

- дальность управления — не менее 100 м по кабельной линии и не менее 500 м по радиоканалу;
- время работы — неограниченно при подаче энергоснабжения по кабелю и не менее трех часов от аккумуляторов;
- оснащенность приспособлениями для отбора проб с грузоподъемностью не менее 15 кг;
- высокая радиационная стойкость (при интегральной дозе гамма-излучения, достигающей 100 Гр);
- измерение мощности дозы гамма-излучения в диапазоне от 0,1 мЗв/ч до 100 Зв/ч для энергий 0,05—3,0 МэВ с погрешностью не более 30 %;
- измерительная аппаратура комплекса должна иметь возможность определять местоположение радиоактивного источника и осуществлять картографирование радиационного загрязнения объектов и местности;
- оснащение гамма-спектрометрической аппаратурой с энергетическим разрешением не более 5 % для энергии гамма-квантов 662 кэВ.

Роботизированная платформа должна выполнять следующие функции:

- доставку блоков детектирования, установленных на платформе, к исследуемым объектам и возврат их к месту расположения пункта управления;
- передачу информации (видео, спектрометрической, о состоянии платформы) на удаленный пульт оператора.

Роботизированная платформа должна удовлетворять следующим требованиям:

- способ передвижения — колесный (4 шт.) или гусеничный (2 шт.);
- двигатели — электрические;
- масса полезной нагрузки, перемещаемой роботизированной платформой, — не менее 20—40 кг;
- перемещение — в любом направлении на плоскости по твердому грунту;
- управление оператором с удаленного пульта;
- условия эксплуатации при температуре от +5 до +50 °С и влажности до 95 %;
- обеспечение электромагнитной совместимости используемого оборудования;
- наличие системы позиционирования ГЛОНАСС (GPS);
- невысокая стоимость.

Текущее состояние работ в НИЯУ МИФИ над роботизированном комплексом (РК)

На данном этапе создана и апробирована система дистанционной связи, передачи и приема сигнала от гамма-спектрометрической системы комплекса. Для управления, простого набора, временного хранения и пересылки гамма-спектров, измеренных с помощью КГС, входящего в состав гамма-спектрометрического комплекса,

используется ПО, которое должно обеспечивать надежное функционирование РК в сложных условиях эксперимента.

С этой целью было разработано программное обеспечение ПО-2 для управления КГС в дистанционном режиме, ориентированное на работу с различными операционными системами (Windows, Linux).

При этом использовался Python, который является высокоуровневым языком программирования общего назначения, ориентированным на повышение эффективности работы оператора за счет упрощения читаемости кода. На рис. 9 представлен скриншот рабочего окна ПО-2 «НАБОР», которое создано для работы с КГС и выполняет следующие операции:

- считывание данных с КГС;
- запись спектра в файл;
- простая визуализация энергетического спектра для понимания корректности работы КГС.

В ПО-2 использовались следующие пакеты и модули:

- **PyQt5** — пакет для создания графического интерфейса пользователя;
- **Matplotli** — библиотека для построения графиков, необходимая для визуализации спектров;
- **FTDID2xx** — библиотека для работы с драйвером FTDI, посредством которого происходит передача данных между компьютером и детектором;
- **Save to SPS** — функция записи в файлы спектров SPS.

ПО-2 «НАБОР» работает по следующему алгоритму:

- после запуска программы производится инициализация драйвера FTDID2xx, считывающего данные с КГС;
- далее происходит подключение к микроконтроллеру FTDID2xx для обмена данными;
- программа настраивает порог срабатывания, порог режекции и время интегрирования сигнала с КГС;
- стартует набор спектра по нажатию соответствующей кнопки;
- каждые две секунды спектр обновляется в окне программы;
- каждую минуту спектр сохраняется во временный файл на жесткий диск ПК;
- набор спектра можно остановить, нажав на кнопку «Stop». При этом на жесткий диск сохраняется спектр, набранный за все время измерения.

Для проверки программы ПО-2 «НАБОР» дистанционного управления КГС использовалась платформа Raspberry Pi 3 Model B+ 1GBRAM, подключенная к операционной системе Linux Raspbian (компактный одноплатный микрокомпьютер).

С помощью КГС и одноплатного компьютера Raspberry Pi были проведены измерения гамма-спектров от гамма-источников ОСГИ ^{133}Ba, ^{60}Co и ^{22}Na. При этом энергетический спектр каждую минуту сохранялся во временном файле SPS.

На платформе Raspberry Pi был запущен сервер программы Team Viewer для удаленного доступа. Это позволило контролировать набор спектра и копировать экспериментальные данные на удаленный ПК. На рис. 10 показан интерфейс ПО-2.

ПО-2 «НАБОР» запущено на платформе Raspberry Pi, подключенной к КГС через TeamViewer.

После этого можно проводить детальное изучение гистограммы, соответствующей энергетическому спектру.

Для рассмотрения отдельных гамма-линий в измеренном энергетическом гамма-спектре можно осуществлять изменение масштаба изображения.

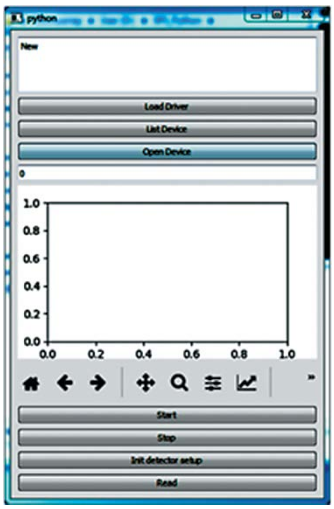

Рис. 9. Скриншот рабочего окна ПО-2 «НАБОР»

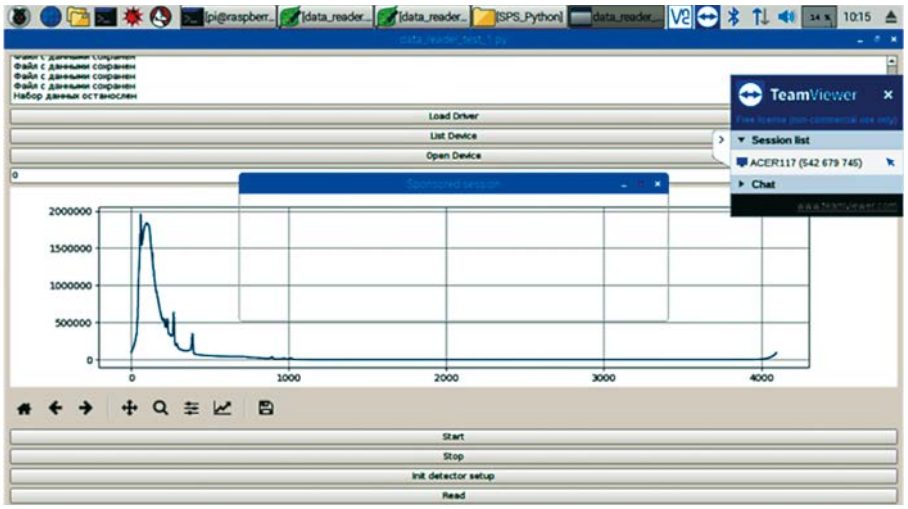

Рис. 10. Гамма-спектр, измеренный с помощью Raspberry Pi

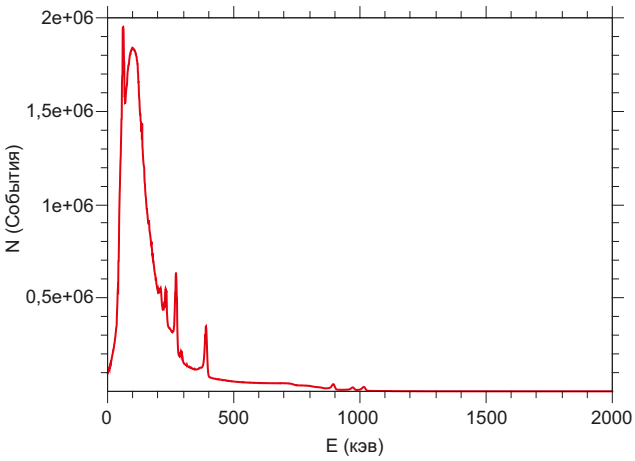

Рис. 11. Гамма-спектр, набранный с помощью ПО-2 «НАБОР», в линейном масштабе

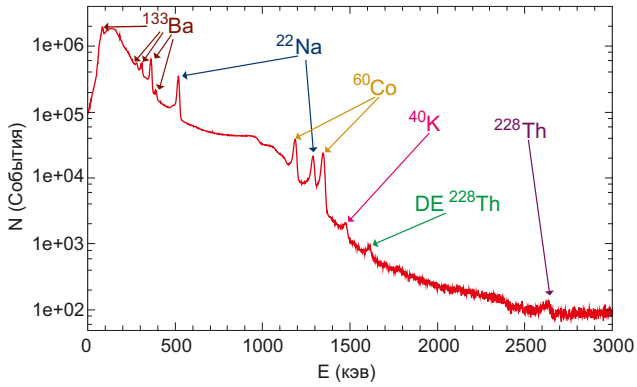

Рис. 12. Гамма-спектр, набранный с помощью ПО-2 «НАБОР», в полулогарифмическом масштабе

С помощью ПО-2 «НАБОР» были измерены гамма-спектры от стандартных гамма-источников ^{133}Ba, ^{60}Co и ^{22}Na: ^{60}Co излучает гамма-кванты с энергиями 1332,5 и 1174 кэВ, ^{22}Na — 1280 и 511 кэВ и ^{133}Ba — 383, 356, 302, 276 и 80 кэВ.

На рис. 11 и 12 показаны энергетические спектры, набранные при помощи ПО-2 Python «НАБОР», запущенного на платформе Raspberry Pi.

В области высоких энергий (больше одного МэВ) на этих рисунках хорошо видны гамма-линии, характерные для естественных радионуклидов ^{40}K и ^{228}Th, обеспечивающих фоновый поток гамма-квантов.

Результаты проведенных измерений продемонстрировали высокую стабильность ПО-2 «НАБОР».

Заключение

Характеристики созданного КГС и разработанных дополнительных систем в составе гамма-спектрометрического комплекса обеспечивают возможность их использования для обнаружения и идентификации радиоактивных и делящихся материалов, а также для контроля радиационной обстановки при обращении с радиоактивными отходами и выводе из эксплуатации ядерно-физических установок.

На следующем этапе работ по созданию АРГСКА планируется создать прототип гамма-спектрометрического комплекса, состоящего из передвижной платформы, навигационной системы и КГС, снабженного цифровым блоком электроники для беспроводной передачи данных, а также для управления всей роботизированной установкой и контроля над ней.

Предлагается также установить на платформе дополнительный механизм, обеспечивающий горизонтальный поворот КГС вместе с коллиматором на 360 градусов для сканирования окружающего пространства. Это позволит более эффективно определять местоположение обнаруженных гамма-источников.

Данная работа была выполнена при поддержке НИЯУ МИФИ.

Литература

1. *Kniazewyc B. G., Irving J. T., Long D. C., Wagoner H.* The implication of remote technology for decontamination activities // Proceedings of the Nineteenth Midyear Topical Symposium Health Physics Society. 1986. Pp. 261—270.

2. *Gelhaus F. E., Roman H. T.* Robot applications in nuclear power plants // Progress in Nuclear Energy. 1990. Vol. 23. Pp. 1—33. DOI: 10.1016/0149-1970(90)90012-T.

3. *Carteret B. A., Hamel W. R., Holliday M. A. et al.* Needs Assessment for Remote Systems Technology at the Chornobyl Unit 4 Shelter. Report of Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA. 1997. DOI: 10.2172/567492.

4. *Abouaf J.* Trial by fire: teleoperated robot targets Chernobyl // IEEE Computer Graphics and Applications. 1998. Vol. 18. No. 4. Pp. 10—14. DOI: 10.1109/38.689654.

5. *Denmeade T. A.* Pioneer's Journey into the Sarcophagus // Nuclear Engineering International. 1998. Vol. 43. Pp. 18—20.

6. *Maimone M. W., Matthies L. H., Osborn J. et al.* A photo-realistic 3-D mapping system for extreme nuclear environments: Chernobyl // Proceedings of the 1998 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Innovations in Theory, Practice and Applications. 1998. Vol. 3. Pp. 1521—1527. DOI: 10.1109/IROS.1998.724814.

7. *Yoshida T., Nagatani K., Tadokoro S., Nishimura T., Koyanagi E.* Improvements to the Rescue Robot Quince Toward Future Indoor Surveillance Missions

in the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant // Field and Service Robotics. 2013. Vol. 92. Pp. 19—32. DOI: 10.1007/978-3-642-40686-7_2.
8. *Miller A., Machrafi R., Mohany A.* Development of a semi-autonomous directional and spectroscopic radiation detection mobile platform // Radiation Measurements. 2015. Vol. 72. Pp. 53—59. DOI: 10.1016/j.radmeas.2014.11.009.
9. *Guzman R., Navarro R., Ferre J., Moreno M.* RESCUER: Development of a Modular Chemical, Biological, Radiological, and Nuclear Robot for Intervention, Sampling, and Situation Awareness // Journal of Field Robotics. 2016. Vol. 33. Pp. 931—945. DOI: 10.1002/rob.21588.
10. *Ducros C., Hauser G., Mahjoubi N., et al.* RICA: A Tracked Robot for Sampling and Radiological Characterization in the Nuclear Field // Journal of Field Robotics. 2017. Vol. 34. Pp. 583—599. DOI: 10.1002/rob.21650.
11. *Kawatsuma S., Fukushima M., Okada T.* Emergency response by robots to Fukushima-Daiichi accident: summary and lessons learned // Ind. Robot. 2012. Vol. 39. Pp. 428—435. DOI: 10.1108/01439911211249715.
12. Официальный сайт компании TEPCO. — URL: http://www.tepco.co.jp (дата обращения 17.07.2020).
13. *Tsitsimpelis I., Taylor C. J., Lennox B., Joyce M. J.* A review of ground-based robotic systems for the characterization of nuclear environments // Progress in Nuclear Energy. 2019. Vol. 111. Pp. 109—124. DOI: 10.1016/J.PNUCENE.2018.10.023.
14. *Danilovich A. S., Potapov V. N., Smirnov S. V.* The remote-controlled spectrometric system for searching and characterization of high-level radioactive waste // EPJ Web of Conferences. 2020. Vol. 225. DOI: 10.1051/epjconf/202022506002.
15. *Dmitrenko V. V., Chemysheva I. V.* Vibrostability of High Pressure Xenon Gamma-Ray Detectors // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2000. No. 47. Pp. 939—943. DOI: 10.1109/23.856722.
16. *Petrenko D., Uteshev Z., Novikov A., Shustov A. et al.* High-voltage power supply with improved thermostability for Xenon gamma-ray spectrometer // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. Vol. 675. P. 042038. International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA-2015). DOI: 10.1088/1742-6596/675/4/042038.
17. *Власик К. Ф и др.* Влияние потоков протонов и нейтронов на спектрометрические характеристики гамма-спектрометра на сжатом ксеноне // Приборы и техника эксперимента. 1998. № 3. С. 19—24.
18. *Dmitrenko V. V., Galper A. M., Gratchev V. et al.* Gamma-radiation background on board Russian orbital stations // Conference on the High Energy Radiation Background in Space. Workshop Record. 1997. Pp. 124—127. DOI: 10.1109/CHERBS.1997.660262.
19. *Krivov S. V., Dmitrenko V. V., Galper A. M. et al.* Measurement of Background 0.1-2.0 MeV Gamma-Ray Radiation Onboard of the Orbital Station MIR // Proceedings Volume 2280. EUV, X-Ray, and Gamma-Ray Instrumentation for Astronomy V, 1994. Pp. 430—434. DOI: 10.1117/12.186830.
20. *Yurkin Y. T. et al.* Measurement of the gamma-ray lines with high-pressure xenon spectrometer on board the orbital station MIR // Proceedings Volume 2006. EUV, X-Ray, and Gamma-Ray Instrumentation for Astronomy IV, 19 November 1993. Pp. 108—111. DOI: 10.1117/12.162824.
21. *Ulin S. et al.* Xenon Gamma-Ray Spectrometer for Radioactive Waste Controlling Complex // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 675. No. 4. Pp. 042023. DOI: 10.1088/1742-6596/675/4/042023.
22. *Ulin S. E. et al.* Application of xenon gamma-ray detectors in portal monitors for detection and identification of radioactive and fissile materials // Proceedings SPIE. 2006. Vol. 6319. Hard X-Ray and Gamma-Ray Detector Physics and Penetrating Radiation Systems VIII. Pp. 631917. DOI: 10.1117/12.681111.
23. *Власик К. В. и др.* Автоматизированная система на основе ксеноновых гамма-спектрометров для контроля газообразных радиоактивных выбросов ядерного реактора // Ядерные измерительно-информационные технологии. 2004. Т. 2. С. 45—53.
24. *Власик К. Ф. и др.* Цифровая обработка сигналов с ксенонового гамма-детектора // Научная сессия НИЯУ МИФИ: аннотации докладов. — Москва, 2012. С. 108.
25. *Дмитренко В. В. и др.* Устройство для регистрации гамма-нейтронного излучения. Патент Российской Федерации RU 2264674, опубл. 06.06.2011. — URL: https://findpatent.ru/patent/226/2264674.html.
26. *Novikov A. S. et al.* New Modification of Xenon Gamma-Ray Detector with High Energy Resolution // Optical Engineering. 2013. Vol. 53. No. 2. Pp. 021108. DOI: 10.1117/1.OE.53.2.021108.
27. *Ulin S. et al.* Xenon Gamma-Ray Spectrometer for Radioactive Waste Controlling Complex // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 675. No. 4. P. 042023. DOI: 10.1088/1742-6596/675/4/042023.
28. *Ulin S. et al.* High-pressure xenon gamma-ray large-volume spectrometer // Proceedings SPIE. 1996. Vol. 2806. Pp. 577—581. DOI: 10.1117/12.254009.
29. *Pyae S. N., Grachev V. M., Dmitrenko V. V. et al.* Xenon Gamma-detector Applicability for Identification and Characterization of Radioactive Waste // Physics Procedia. Fundamental Research in Particle Physics and Cosmophysics. 2015. Vol. 74. Pp. 352—356. DOI: 10.1016/j.phpro.2015.09.191.

Информация об авторах

Маджидов Азизбек Истамович, ассистент, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31), e-mail: aimadzhidov@mephi.ru.

Дмитренко Валерий Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31), e-mail: vvdmitrenko@gmail.com.

Улин Сергей Евгеньевич, доктор физико-математических наук, профессор, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31), e-mail: SEUlin@gmail.com.

Грачев Виктор Михайлович, кандидат физико-математических наук, доцент, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31), e-mail: VMGrachev@mephi.ru.

Власик Константин Федорович, кандидат физико-математических наук, инженер, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31), e-mail: KFVlasik@mephi.ru.

Егоров Роман Романович, ведущий инженер, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31), e-mail: RREgorov@mephi.ru.

Кривова Кира Валериановна, инженер, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31), e-mail: KVKriviva@mephi.ru.

Утешев Зияэтдин Мухамедович, кандидат физико-математических наук, инженер, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31), e-mail: ZMUteshev@mephi.ru.

Чернышова Ирина Вячеславовна, кандидат физико-математических наук, доцент, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31), e-mail: IVChernysheva@gmail.com.

Шустов Александр Евгеньевич, старший преподаватель, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31), e-mail: AEShustov@mephi.ru.

Библиографическое описание статьи

Маджидов А. И., Дмитренко В. В., Улин С. Е., Грачев В. М., Власик К. Ф., Егоров Р. Р., Кривова К. В., Утешев З. М., Чернышева И. В., Шустов А. Е. Перспективы использования ксенонового гамма-спектрометра в качестве регистрирующего устройства на борту автоматизированного и роботизированного гамма-спектрометрического комплекса для вывода из эксплуатации ядерно-физических установок // Радиоактивные отходы. 2022. № 2 (19). С. 56—67. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-2-56-67.

PROSPECTS OF XENON GAMMA SPECTROMETER APPLICATION AS A RECORDING DEVICE ON BOARD OF AN AUTOMATED AND ROBOTIC GAMMA-RAY SPECTROMETRIC COMPLEX FOR THE DECOMMISSIONING OF NUCLEAR PHYSICAL INSTALLATIONS

Madzhidov A. I., Dmitrenko V. V., Ulin S. E., Grachev V. M., Vlasik K. F., Egorov R. R., Krivova K. V., Uteshev Z. M., Chernysheva I. V., Shustov A. E.

National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

Article received on April 26, 2022

The paper considers the structure of robotic gamma-spectrometric complexes for the decommissioning of nuclear facilities. It presents physical and technical characteristics of xenon gamma-ray spectrometer considered a key instrument for gamma-ray spectra measurements of analyzed objects and their activity. The study demonstrated the feasibility of xenon gamma spectrometers application in the decommissioning of nuclear facilities. Remotely received

information from a gamma spectrometric complex is transmitted via Internet to a remote computer enabling real-time processing of the experimental data.

Keywords: *gamma radiation, energy spectrum, xenon, nuclide, nuclear facility, radioactive waste.*

References

1. Kniazewyc B. G., Irving J. T., Long D. C., Wagoner H. The implication of remote technology for decontamination activities. *Proceedings of the Nineteenth Midyear Topical Symposium Health Physics Society,* 1986, pp. 261—270.
2. Gelhaus F. E., Roman H. T. Robot applications in nuclear power plants. *Progress in Nuclear Energy,* 1990, vol. 23, pp. 1—33. DOI: 10.1016/0149-1970(90)90012-T.
3. Carteret B. A., Hamel W. R., Holliday M. A. et al. *Needs Assessment for Remote Systems Technology at the Chornobyl Unit 4 Shelter*. Report of Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA. 1997. DOI: 10.2172/567492.
4. Abouaf J. Trial by fire: teleoperated robot targets Chernobyl. *IEEE Computer Graphics and Applications,* 1998, vol. 18, no. 4, pp. 10—14. DOI: 10.1109/38.689654.
5. Denmeade T. A. Pioneer's Journey into the Sarcophagus. *Nuclear Engineering International,* 1998, vol. 43, pp. 18—20.
6. Maimone M. W., Matthies L. H., Osborn J. et al. A photo-realistic 3-D mapping system for extreme nuclear environments: Chernobyl. *Proceedings of the 1998 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Innovations in Theory, Practice and Applications,* 1998, vol. 3, pp. 1521—1527. DOI: 10.1109/IROS.1998.724814.
7. Yoshida T., Nagatani K., Tadokoro S., Nishimura T., Koyanagi E. Improvements to the Rescue Robot Quince Toward Future Indoor Surveillance Missions in the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. *Field and Service Robotics,* 2013, vol. 92, pp. 19—32. DOI: 10.1007/978-3-642-40686-7_2.
8. Miller A., Machrafi R., Mohany A. Development of a semi-autonomous directional and spectroscopic radiation detection mobile platform. *Radiation Measurements,* 2015, vol. 72, pp. 53—59. DOI: 10.1016/j.radmeas.2014.11.009.
9. Guzman R., Navarro R., Ferre J., Moreno M. RESCUER: Development of a Modular Chemical, Biological, Radiological, and Nuclear Robot for Intervention, Sampling, and Situation Awareness. *Journal of Field Robotics,* 2016, vol. 33, pp. 931—945. DOI: 10.1002/rob.21588.
10. Ducros C., Hauser G., Mahjoubi N., et al. RICA: A Tracked Robot for Sampling and Radiological Characterization in the Nuclear Field. *Journal of Field Robotics,* 2017, vol. 34, pp. 583—599. DOI: 10.1002/rob.21650.
11. Kawatsuma S., Fukushima M., Okada T. Emergency response by robots to Fukushima-Daiichi accident: summary and lessons learned. *Ind. Robot.,* 2012, vol. 39. pp. 428—435. DOI: 10.1108/01439911211249715.
12. Official web-site of TEPCO company. — URL: http://www.tepco.co.jp (accessed 17.07.2020).
13. Tsitsimpelis I., Taylor C. J., Lennox B., Joyce M. J. A review of ground-based robotic systems for the characterization of nuclear environments. *Progress in Nuclear Energy,* 2019, vol. 111, pp. 109—124. DOI: 10.1016/J.PNUCENE.2018.10.023.
14. Danilovich A. S., Potapov V. N., Smirnov S. V. The remote-controlled spectrometric system for searching and characterization of high-level radioactive waste. *EPJ Web of Conferences,* 2020, vol. 225. DOI: 10.1051/epjconf/202022506002.
15. Dmitrenko V. V., Chemysheva I. V. Vibrostability of High Pressure Xenon Gamma-Ray Detectors. *IEEE Transactions on Nuclear Science,* 2000, no. 47, pp. 939—943. DOI: 10.1109/23.856722.
16. Petrenko D., Uteshev Z., Novikov A., Shustov A. et al. High-voltage power supply with improved thermostability for Xenon gamma-ray spectrometer. *J. Phys.: Conf. Ser.,* 2016, vol. 675, pp. 042038. International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA-2015). DOI: 10.1088/1742-6596/675/4/042038.
17. Vlasik K. F. et al. Vliyanie potokov protonov i neitronov na spektrometricheskie kharakteristiki gamma-spektrometra na szhatom ksenone [Influence of proton and neutron fluxes on the spectrometric characteristics of a compressed xenon gamma spectrometer]. *Pribory i tekhnika ehksperimenta — Instruments and Experimental Technique,* 1998, no. 3, p. 19.
18. Dmitrenko V. V., Galper A. M., Gratchev V. et al. Gamma-radiation background on board Russian orbital stations. *Conference on the High Energy Radiation Background in Space. Workshop Record,* 1997, pp. 124—127. DOI: 10.1109/CHERBS.1997.660262.
19. Krivov S. V., Dmitrenko V. V., Galper A. M. et al. Measurement of Background 0.1-2.0 MeV Gamma-Ray Radiation Onboard of the Orbital Station MIR. *Proceedings Volume 2280. EUV, X-Ray, and Gamma-Ray Instrumentation for Astronomy V,* 1994, pp. 430—434. DOI: 10.1117/12.186830.
20. Yurkin Y. T. et al. Measurement of the gamma-ray lines with high-pressure xenon spectrometer on board the orbital station MIR. *Proceedings Volume 2006. EUV, X-Ray, and Gamma-Ray Instrumentation for Astronomy IV,* 19 November 1993. Pp. 108—111. DOI: 10.1117/12.162824.

21. Ulin S. et al. Xenon Gamma-Ray Spectrometer for Radioactive Waste Controlling Complex. *Journal of Physics: Conference Series,* 2016, vol. 675, no. 4, pp. 042023. DOI: 10.1088/1742-6596/675/4/042023.
22. Ulin S. E. et al. Application of xenon gamma-ray detectors in portal monitors for detection and identification of radioactive and fissile materials. *Proceedings SPIE, Hard X-Ray and Gamma-Ray Detector Physics and Penetrating Radiation Systems VIII,* 2006, vol. 6319, pp. 631917. DOI: 10.1117/12.681111.
23. Vlasik K. V. et al. Avtomatizirovannaya sistema na osnove ksenonovykh gamma-spektrometrov dlya kontrolya gazoobraznykh radioaktivnykh vybrosov yadernogo reaktora [Automated system based on xenon gamma spectrometers used to monitor gaseous radioactive emissions from a nuclear reactor]. *Yadernye izmeritel'no-informatsionnye tekhnologii — Nuclear measurement and information technologies,* 2004, vol. 2, pp. 45—53.
24. Vlasik K. F. et al. Tsifrovaya obrabotka signalov s ksenonovogo gamma-detektora [Digital processing of signals from a xenon gamma detector]. *Scientific session of NRNU MEPhI: abstracts of reports.* — Moscow, 2012, pp. 108.
25. Dmitrenko V. V. et al. *Ustroistvo dlya registratsii gamma-neitronnogo izlucheniya* [Registration device for gamma-neutron radiation]. RU Patent 2264674, publ. June 6, 2011. — URL: https://findpatent.ru/patent/226/2264674.html.
26. Novikov A. S. et al. New Modification of Xenon Gamma-Ray Detector with High Energy Resolution. *Optical Engineering,* 2013, vol. 53, no. 2, pp. 021108. DOI: 10.1117/1.OE.53.2.021108.
27. Ulin S. et al. Xenon Gamma-Ray Spectrometer for Radioactive Waste Controlling Complex. *Journal of Physics: Conference Series,* 2016, vol. 675, no. 4, pp. 042023. DOI: 10.1088/1742-6596/675/4/042023.
28. Ulin S. et al. High-pressure xenon gamma-ray large-volume spectrometer. *Proceedings SPIE,* 1996, vol. 2806, pp. 577—581. DOI: 10.1117/12.254009.
29. Pyae S. N., Grachev V. M., Dmitrenko V. V. et al. Xenon Gamma-detector Applicability for Identification and Characterization of Radioactive Waste. Physics Procedia. *Fundamental Research in Particle Physics and Cosmophysics,* 2015, vol. 74, pp. 352—356. DOI: 10.1016/j.phpro.2015.09.191.

Information about the authors

Madzhidov Azizbek Istamovich, assistant, National Research Nuclear University MEPhI (31, Kashirskoe shosse, Moscow, 115409, Russia), e-mail: aimadzhidov@mephi.ru.

Dmitrienko Valery Vasilyevich, Ph.D. of Sciences, professor, National Research Nuclear University MEPhI (31, Kashirskoe shosse, Moscow, 115409, Russia), e-mail: vvdmitrenko@gmail.com.

Ulin Sergey Yevgenyevich, Ph.D. of Sciences, professor, National Research Nuclear University MEPhI (31, Kashirskoe shosse, Moscow, 115409, Russia), e-mail: SEUlin@gmail.com.

Grachev Victor Mikhailovich, Ph.D. science, associate professor, National Research Nuclear University MEPhI (31, Kashirskoe shosse, Moscow, 115409, Russia), e-mail: VMGrachev@mephi.ru.

Vlasik Konstantin Fedorovich, Ph.D. science, engineer, National Research Nuclear University MEPhI (31, Kashirskoe shosse, Moscow, 115409, Russia), e-mail: KFVlasik@mephi.ru.

Egorov Roman Romanovich, lead engineer, National Research Nuclear University MEPhI (31, Kashirskoe shosse, Moscow, 115409, Russia), e-mail: RREgorov@mephi.ru.

Krivova Kira Valerianovna, engineer, National Research Nuclear University MEPhI (31, Kashirskoe shosse, Moscow, 115409, Russia), e-mail: KVKriviva@mephi.ru.

Uteshev Ziyaetdin Mukhamedovich, Ph.D. science, engineer, National Research Nuclear University MEPhI (31, Kashirskoe shosse, Moscow, 115409, Russia), e-mail: ZMUteshev@mephi.ru.

Chernysheva Irina Vyacheslavovna, Ph.D. science, associate professor, National Research Nuclear University MEPhI (31, Kashirskoe shosse, Moscow, 115409, Russia), e-mail: IVChernysheva@gmail.com.

Shustov Alexander Yevgenyevich, senior lecturer, National Research Nuclear University MEPhI (31, Kashirskoe shosse, Moscow, 115409, Russia), e-mail: AEShustov@mephi.ru.

Bibliographic description

Madzhidov A.I., Dmitrenko V. V., Ulin S. E., Grachev V. M., Vlasik K. F., Egorov R. R., Krivova K. V., Uteshev Z. M., Chernysheva I. V., Shustov A. E. Prospects of Xenon Gamma Spectrometer Application as a Recording Device on Board of an Automated and Robotic Gamma-Ray Spectrometric Complex for the Decommissioning of Nuclear Physical Installations. *Radioactive Waste,* 2022, no. 2 (19), pp. 56—67. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-2-56-67. (In Russian).