

УДК 531.38: 539.16: 504.3: 621.039.586

Бабак С.В.¹, Ильин Ю.Ю.², Подреза С.М.³, Лещенко Ю.Т.⁴, Канченко В.А.², Чепур Н.Л.²¹ Государственное предприятие «НТЦ новейших технологий НАН Украины». Украина, Киев² Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины. Украина, Чернобыль³ Государственное предприятие «Завод 410 ГА». Украина, Киев⁴ Частное предприятие «Эркар». Украина, Киев

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ПРИ РАДИАЦИОННЫХ АВАРИЯХ

Рассмотрен беспилотный летательный аппарат, изокинетический пробоотборник радиоактивных аэрозолей и навигационный радиометр для подвижных объектов, которые могут быть использованы для мониторинга окружающей среды в случае радиационных аварий. Приведены результаты их калибровки и экспериментальных исследований.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат; мониторинга окружающей среды.

Постановка проблемы

Радиационные аварии на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1» показали необходимость оперативного дистанционного контроля внешних повреждений и радиационной обстановки в начальный период аварии. Такая возможность появилась с развитием малых беспилотных летательных аппаратов (БЛА).

Так, первая серия снимков АЭС «Фукусима-1» была сделана 20 и 24 марта 2011 года (через 9 и 13 дней после аварии соответственно) с помощью сверхлегкого дистанционно управляемого БЛА (рис. 1) компании Air Photo Service из префектуры Ниигата [1]. Характеристики самолета и его дальнейшая эксплуатация не приводятся. Из рис. 1 видно, что БЛА выполнен по классической двухбалочной аэродинамической схеме с толкающим винтом и двигателем внутреннего сгорания.

В то же время в начальной фазе аварии отсутствовала возможность дистанционного мониторинга. Именно поэтому исследование малого БЛА, который за короткое время позволит провести радиационный контроль, имеет важное практическое значение.

Радиационный мониторинг на АЭС «Фукусима 1»

По решению властей Японии, применение небольших БЛА даст возможность более точно определять реальную обстановку в разных точках на АЭС. Для этого в Японию было поставлено четыре БЛА (рис. 2) типа RQ-16 T-Hawk известной американской компании Honeywell.

T-Hawk [2] обладает функцией дистанционного наведения и увеличения изображения в режиме реального времени. Все четыре аппарата, работав-



Рис.1. БЛА Air Photo Service



Рис. 2. БЛА T-Hawk



ших на Фукусиме, были оснащены сенсорами для измерения уровня радиации. О характеристиках этих сенсоров сообщений нет. Стоит отметить, что один из БЛА Т-Hawk упал и взорвался на крыше второго реактора во время одного из полетов в июне 2011, но это никак не умаляет эффективность их использования в подобной ситуации.

В начале декабря 2013 года около вытяжной трубы реакторов № 1 и № 2 был зафиксирован уровень радиации величиной 25 Зв/ч. Это самый высокий уровень радиации, который был зафиксирован снаружи станции.

В настоящее время [3] в Японии тестируют прототип беспилотного летательного аппарата, который будет следить за уровнем радиации в районе аварийной атомной станции «Фукусима-1». БЛА разработан специалистами МАГАТЭ, имеет округлую форму и приводится в действие шестью двигателями. Он оборудован встроенными камерами, несколькими дозиметрами и может летать в полностью автономном режиме. МАГАТЭ планирует начать его использование на аварийной японской АЭС не раньше 2015 года. БЛА МАГАТЭ является модернизированным БЛА Т-Hawk.

Уровень радиации в труднодоступных местах на Фукусиме сейчас контролируют с помощью специального беспилотного вертолета, который, в отличие от БЛА МАГАТЭ, не может приближаться к зданиям и ЛЭП.

Таким образом, пример Фукусимы-1 показал целесообразность и эффективность использования малых БЛА для геоинформационного мониторинга окружающей среды при радиационных авариях.

Цель работы

С учетом изложенного цель настоящей работы состоит в исследовании возможности создания относительно простого и дешевого малого БЛА для геоинформационного мониторинга окружающей среды в начальной фазе радиационной аварии. При этом под геоинформационным мониторингом здесь понимается:

- проведение видео наблюдения подстилающей поверхности;
- отбор проб радиоактивных аэрозолей в различных слоях факела и на разных расстояниях от источника выброса;
- измерение радиационного фона в заданных координатах воздушного пространства.

Основные технические требования

Беспилотный летательный аппарат.

Так как аварийные ситуации возникают неожиданно, то логично использовать БЛА, не требующий для старта и посадки подготовленной площад-

ки, с минимальным временем разворачивания. БЛА должен иметь возможность ручного дистанционного управления, а также выполнять полет в автоматическом режиме (под управлением автопилота). Дальность полета до 10 км. со скоростями (60–80) км/ч. С учетом полезной нагрузки (видеоканал переднего обзора, автопилот, устройство отбора проб, измеритель радиационного фона) взлетный вес должен составлять 2-4 кг. Приемлемым для удовлетворения таких требований является БЛА самолетного типа с толкающим винтом на электрической тяге. Не останавливаясь на широком спектре подобных БЛА, выпускаемых во многих странах, отметим, что научно-техническая сложность их создания отсутствует. Однако компоновка под различные полезные нагрузки приводит к отсутствию универсального БЛА.

Изокинетический пробоотборник аэрозолей.

Применяемые в настоящее время для этих целей фильтро-вентиляционные устройства (ФВУ) производят отбор проб в приземном воздушном слое [4, 5]. С учетом того, что чувствительность методов (например) гамма спектроскопии около 0,5 Бк/пробу, а объемные активности атмосферного воздуха порядка 10^{-5} Бк/м³, то для их измерения надо прокачивать через фильтр десятки – сотни тысяч м³. Это приводит к необходимости использования мощных вентиляторов для достижения производительности установок величиной 500–3000 м³/ч. Отсюда их габариты, вес и энергопотребление.

Для нашего случая ситуация иная. При авариях объемная активность достигает величины единиц и десятков Бк/м³. В этом случае достаточно профильтровать ≈ 1 м³. Эту процедуру можно выполнить без применения вентиляционных установок, с использованием движение БЛА в атмосфере. В работе исследован такой изокинетический пробоотборник аэрозолей, выполненный в виде фильроэжекторного устройства.

Радиометр навигационный автоматический.

Существует широкая номенклатура дозиметрических устройств для измерения мощности экспозиционной дозы (МЭД): бытовые, профессиональные, специального назначения. Скомпоновать их с GPS приемником для одновременного определения МЭД и пространственных координат проблемы не представляет [6]. Однако, для использования их в БЛА нужны уменьшенные габаритно-весовые показатели, изменения алгоритмов работы, выбор необходимого диапазона измерений, способов регистрации и пр.

Поэтому мы пошли по пути создания малогабаритного радиометра с приемлемыми для решения нашей задачи характеристиками.

Принцип действия и характеристики созданных устройств

Изокинетический пробоотборник аэрозолей.

Обычно такие пробоотборники [7] имеют в своем составе входную трубку, фильтр, воздуховод и соединенные с ним насос с электроприводом и ветровое колесо. В этих устройствах под влиянием разрежения, создаваемого насосом, часть потока аэрозолей засасывается во входную трубку, проходит через фильтр, где происходит отделение аэрозолей, воздуховод и через полые лопасти ветрового колеса выбрасывается в атмосферу. Пробоотборник ориентируется в горизонтальной плоскости навстречу ветру на вертикальной стойке за счет эффекта самоориентации ветрового колеса, а также посредством флюгера. Поддержание условия изокинетичности осуществляется специальной системой автоматического регулирования по сигналам с датчиков давления газа во входной трубке и в невозмущенном потоке. Их основной недостаток – невозможность установки в БЛА.

Предложенный изокинетический пробоотборник лишен этого недостатка за счет изменения принципа пробоотбора. Для лучшего понимания принципа работы такого изокинетического пробоотборника, который выполнен в виде фильтроэжекционного устройства (ФЭУ), рассмотрим его схему (рис. 3).

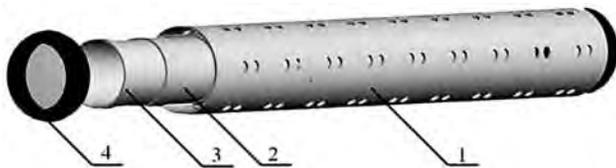


Рис. 3. Схема ФЭУ:
1 – внешний корпус (эжектор), 2 – внутренний сетчатый корпус, 3 – фильтр, 4 – входной фланец

ФЭУ устанавливается на БЛА параллельно продольной оси самолета так, что входной фланец 4 с отверстием $D_{вх}$ направлен в направлении полета. При полете БЛА набегающий на ФЭУ воздушный поток разделяется на две части. Одна из них направлена в середину ФЭУ через отверстие во входном фланце. Для небольших высот полета полагаем статическое давление атмосферным P_a . Тогда с учетом уравнения Бернулли [8], возникающее внутри ФЭУ динамическое давление (воздушный напор) составит:

$$\Delta P_{д} = P_a + \left(\rho \frac{V^2}{2} \times C_{аэро} \right), \quad (1)$$

где ρ – плотность воздушного потока $1,225 \text{ кг/м}^3$, $\rho \frac{V^2}{2}$ – скоростной напор при заданной скорости (V)

полета БЛА, $C_{аэро}$ – коэффициент, определяемый аэродинамическим сопротивлением ФЭУ. Изнутри ФЭУ за счет $\Delta P_{д}$ воздух проходит через фильтр 3, внутренний сетчатый корпус 2 и выходит наружу ФЭУ через эжектор 1.

Вторая часть воздушного потока, обтекающая внешнюю поверхность ФЭУ, приводит к уменьшению статического давления до величины

$$\Delta P_{э} = P_a - \rho \frac{V^2}{2}, \quad (2)$$

За счет эжекции ($\Delta P_{э}$) воздух изнутри ФЭУ также будет проходить через фильтроткань 3 наружу.

Оба этих механизма и определяют производительность Q ($\text{м}^3/\text{ч}$) ФЭУ для данной скорости полета V . Обратимся к изготовленному и исследованному в работе ФЭУ. Его внешний вид показан на рис. 4.

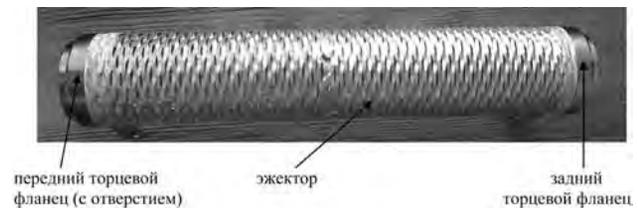


Рис. 4. Изготовленный ФЭУ

Характеристики этого ФЭУ следующие.

Общая длина $L = 300 \text{ мм}$.

Эффективная длина (без учета фланцев и клеевых соединений) $L_{эфф} = 250 \text{ мм}$.

Диаметр эжектора $D_э = 53 \text{ мм}$.

Эффективная площадь эжектора (без учета площади паек) $S_э = 370 \text{ см}^2$.

Диаметр входного отверстия ФЭУ – $D_{вх} = 37 \text{ мм}$ ($S_{вх} = 10,7 \text{ см}^2$), при этом эффективная площадь фильтроткани составляет $S_{ф} = 160 \text{ см}^2$.

Снаряженный вес – 310 г.

В качестве фильтроткани использована применяемая в таких случаях [9] ткань Петрянова типа ФПП-15-1,5. Определяющей величиной для нее [10] является сопротивление равное 15 Па при скорости воздушного потока через ткань 1 см/с.

Первая часть экспериментальных исследований состояла в определении эффективности ФЭУ Q ($\text{м}^3/\text{ч}$) при действии воздушного напора без учета эжекции. Для этого ФЭУ помещалось внутрь цилиндра большего диаметра, который со стороны входного отверстия герметично соединялся с образующей переднего фланца, а выход этого цилиндра через патрубок с площадью поперечного сечения $S_{вых} = 7,54 \text{ см}^2$ соединялся с анемометром Turnigy Mini (Sirius35). Анемометром измерялась скорость выходного воздушного потока по шкале Бофорта в м/с. Диапазон измерения

анемометра $V_a = 0,3 - 30$ м/с, погрешность измерения $\pm 5\%$. ФЭУ был установлен на автомобиле. В этом случае производительность $Q = S_{\text{вых}} \times V_a$.

Вторая часть экспериментальных исследований состояла в определении эффективности ФЭУ Q (м³/ч) за счет эжекции при действии воздушного потока, обтекаемого ФЭУ. Для этого фланцы ФЭУ менялись местами, на задний фланец устанавливалась коническая насадка, а отверстие переднего фланца (как и в первом эксперименте) через патрубок соединялся с анемометром Sirius35.

В данном случае внутри ФЭУ имеем P_a , а снаружи $\Delta P_{\text{э}} = P_a - \rho \frac{V^2}{2}$. Как и в предыдущем случае, поток идет изнутри наружу ФЭУ. В первом случае за счет увеличения давления внутри, теперь за счет уменьшения давления вне ФЭУ.

Полагая производительность данного ФЭУ в виде суммы двух экспериментально полученных, определяем калибровочную характеристику, которая показана на рис. 5.

Здесь квадратиками (на графике цифра 1) обозначены объемы для данных скоростей через поперечное сечение площадью $S_{\text{вх}} = 10,7$ см², а зависимость, проходящая через ромбики (на графике цифра 2) – калибровочная характеристика ФЭУ. Например, за час полета на скорости 80 км/ч с помощью нашего ФЭУ можно проанализировать 40 м³.

Таким образом, установив на БЛА такой ФЭУ, при скорости полета 70–80 км/ч через указанный тип фильтра за 1,5–2 мин. будет проведен отбор радиоактивных аэрозолей из 1 м³ атмосферного воздуха.

Радиометр навигационный автоматический.

Для измерения радиационного фона (мощности экспозиционной дозы – МЭД) разработана схема и изготовлен радиометр навигационный автоматический (РНА), который в автоматическом режиме позволяет определять МЭД в заданных пространственных координатах с одновременной регистрацией долготы, широты и высоты места измерения. РНА – автономное устройство, которое может быть установлено на любом подвижном объекте. Его габаритно – весовые характеристики позволяют использование и на БЛА. Функциональная схема РНА показана на рис. 6.

Обратимся к описанию компонент приведенной схемы.

Основу РНА составляет однокристалльная микро-ЭВМ с RISC-архитектурой семейства «ATXmega», производства компании Atmel, далее по тексту «микроконтроллер». Микроконтроллер является согласующим звеном между отдельными блоками ДНС и управляет его функциями в целом согласно записанной в ППЗУ программы.

Базовой функцией РНА является измерение МЭД гамма излучения, для чего предусмотрены следующие блоки: источник высокого напряжения, счетчик Гейгера-Мюллера (типа СИ22Б) и формирователь импульсов. Для уменьшения погрешности выбрано параллельное включение двух счетчиков, а сглаживание результатов измерений осуществляется использованием математической фильтрации методом линейно-взвешенной скользящей средней.

Карта памяти стандарта «micro SD» является универсальным носителем цифровой информации. Она

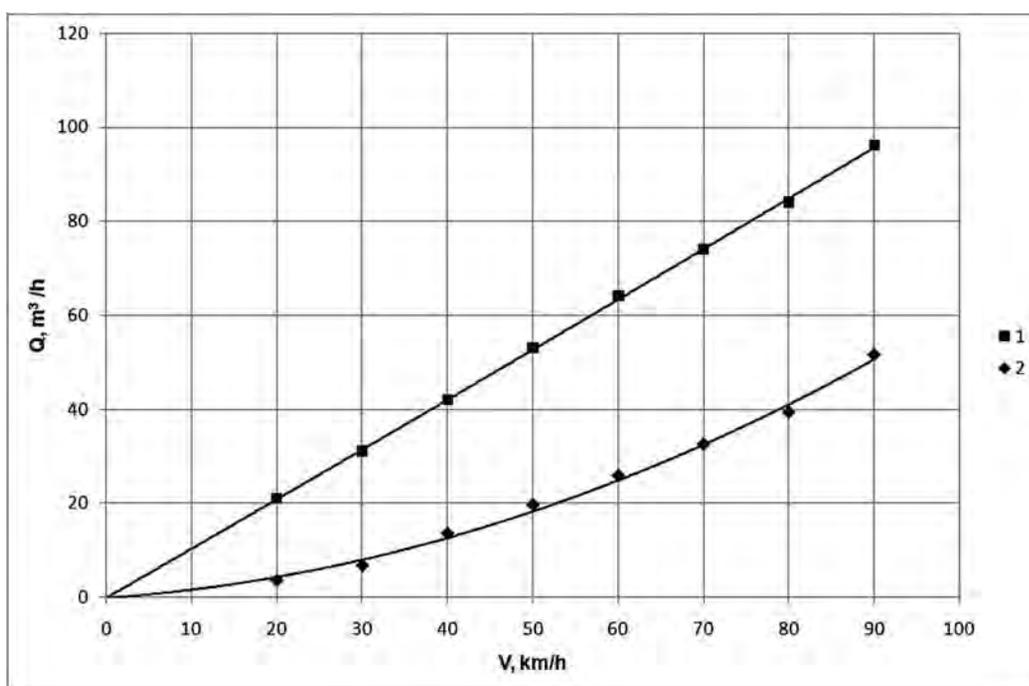


Рис. 5. Калибровочная характеристика ФЭУ

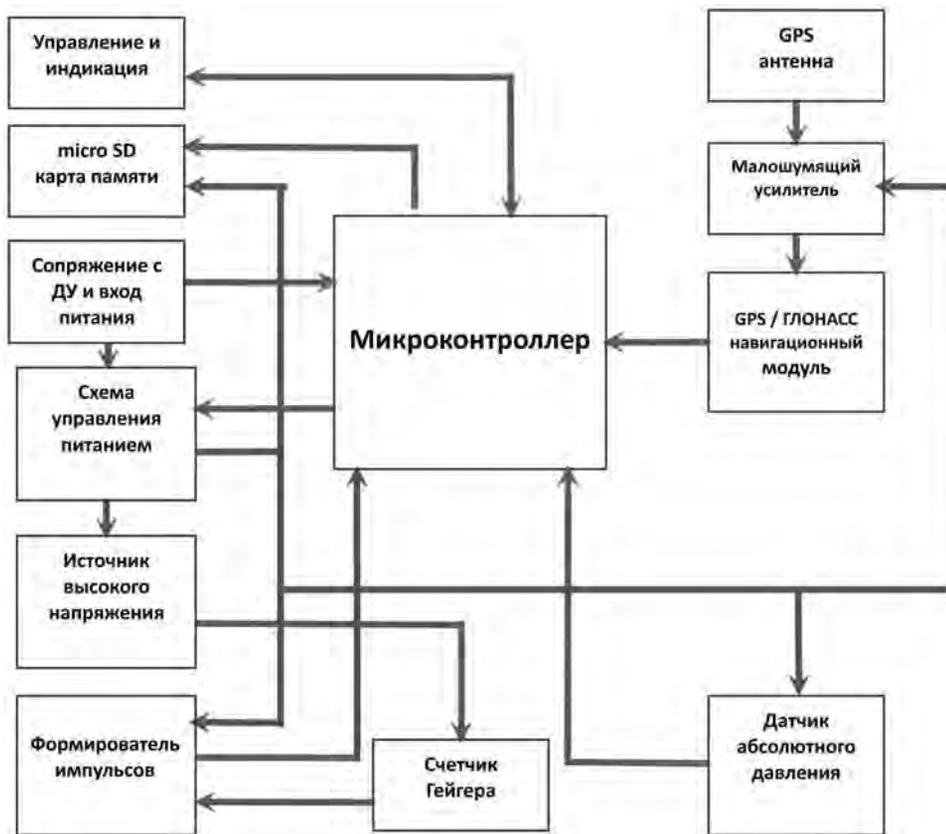


Рис. 6. Схема функциональная РНА

предназначена для периодического сохранения отчета об уровнях МЭД и относительной высоте с привязкой к географическому местоположению устройства. Формат сохраняемого файла соответствует требованиям стандарта «*.KML». Таким образом, сохраненные данные могут быть визуализированы в программе «GoogleEarth» любой актуальной версии

Подключение источника электропитания (на схеме не показан) совмещено с одним из входов приемника БЛА, воспринимающего управляющие сигналы пульта дистанционного управления (ДУ) либо сигналы автопилота. Сигнал формата «PPM» от приемника пульта ДУ поступает на порт микроконтроллера, где декодируется программно. Номинальное напряжение питания устройства находится в диапазоне от 3.4 до 5.5 вольт, пиковый ток потребления составляет не более 200 мА, интегральный – не более 90 мА. При использовании автономного аккумулятора емкостью (например) 2000 мАч ДНС может непрерывно работать в течение 20 часов.

В состав органов управления и индикации входят светодиодные индикаторы состояния, электромагнитный, либо пьезоэлектрический капсюль, а так же тактовый микровыключатель для выбора степени фильтрации результатов измерения.

Датчик абсолютного давления измеряет высоту подъема РНА относительно точки калибровки. При начальной инициализации датчик измеряет атмо-

сферное давление, принимая его за точку отсчета (нулевая высота). В дальнейшем разница между давлением, измеренным при инициализации и периодически измеряемым, математически переводится в высоту в метрах.

GPS / ГЛОНАСС навигационный модуль определяет географические координаты посредством спутниковых систем навигации GPS или ГЛОНАСС, либо обеих систем одновременно и передает эти данные по стандарту «NMEA» микроконтроллеру РНА, где происходит их дальнейшая обработка.

Время измерения дозиметра можно устанавливать величиной 3, 5, 10, 15 или 30 сек. При этом такт съема информации остается неизменным и составляет 1 сек. Так как мы в процессе измерения используем метод линейно-взвешенной скользящей средней, то результат каждого такта съема информации представляет собой среднее значение МЭД на отрезке пути $S = t_{\text{изм}} \times V_0$ с учетом предыдущих t результатов ($t_{\text{изм}}$ – время измерения дозиметра, V_0 – скорость движения объекта, на котором установлен РНА).

РНА был откалиброван на установке УПД-интер в ИПБ АЭС НАНУ. Калибровка проведена в диапазоне МЭД от 20 мкР/ч до 50 мР/ч по ^{137}Cs .

Внешний вид РНА показан на рис. 7.

Все компоненты РНА установлены в электронном блоке (БЭ). Отдельно расположены счетчики



Рис. 7. Конструкция РНА

Гейгера-Мюллера (СГМ), источник питания (БП), GPS антенна (А) и органы управления и индикации (ОУИ).

РНА собранный и готовый к установке в БЛА либо иной подвижный объект показан на рис. 8.

Эксперимент

Эксперименты были проведены с использованием БЛА, показанного на рис. 9.

Как видно изокинетический пробоотборник аэрозолей (рис. 4) установлен на фюзеляже БЛА. Радиометр навигационный автоматический (рис. 8) был установлен внутри фюзеляжа.

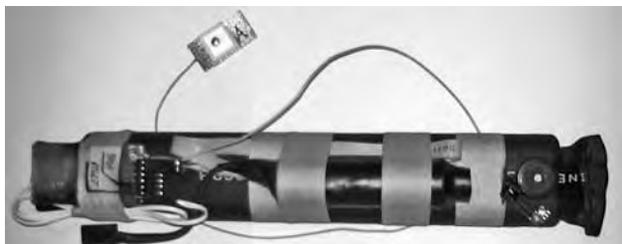


Рис. 8. РНА готовый к установке в подвижный объект



Рис. 9. БЛА

Пробоотбор аэрозолей был выполнен возле села Потоки, расположенного рядом с КПП «Старые Соколы» и находящегося на расстоянии 31 км от ЧАЭС. Полеты выполнены в мае-июне 2013 г. при максимальных восходящих потоках. Ветер северо-восточный (со стороны ЧАЭС) со скоростью 3–5 м/сек. На высотах 90 м и 180 м последовательно профильтровано по 30 м³ воздуха, на высоте 70 м – 60 м³. Все три фильтра были переданы для анализа в Отделение ядерной и радиационной безопасности (г. Чернобыль) ИПБ АЭС НАН Украины. Анализ был проведен методом γ -спектроскопии. Для высот 90 м и 180 м чувствительность составила $\approx 0,02$ Бк/м³, а для 70 м – 0,007 Бк/м³. Для всех случаев активность не была обнаружена.

Измерение мощности экспозиционной дозы при помощи созданного РНА на первом этапе было проведено установкой его на автомобиле, который перемещался в Киеве по проспекту Победы. Фрагмент полученного трека показан на рис. 10.

На этом рисунке показана часть проспекта в районе станции метро «Нивки». В точках съема информации слева от @ величина МЭД в мкЗв/ч, а справа – высота в метрах относительно ее значения в месте начальной калибровки.

На следующем этапе РНА был установлен в БЛА, показанном на рис. 9. Полеты выполнены в Киеве на аэродроме «Чайка».

Один из полученных треков показан на рис. 11. Начало трека (левая верхняя часть) это точка взлета, а далее набор высоты до 140 м (левые нижние значения на треке).

Выводы

Выполненные исследования беспилотного летательного аппарата самолетного типа с установленными на нем изокинетическим пробоотборником радиоактивных аэрозолей и навигационным радиометром позволяют сделать вывод о том, что такой малогабаритный комплекс возможно применять при радиационных авариях особенно в их начальной фазе.

Действительно, такой БЛА весом около 2,5 кг, продолжительностью полета до 1 часа на скорости 70 км/ч, не требующий подготовленных площадок для взлета – посадки и времени подготовки к полету не более 10 мин, представляется удобным средством дистанционного контроля радиационной обстановки.

Литература

- [1] http://nnm.ru/blogs/Etacom/snimki_vysokogo_razresheniya_aes_fukusima-1_vid_s_vozduha/.
- [2] <http://en.academic.ru/dic.nsf/enwiki/11550415#Design>.
- [3] <http://veteranychernobyl.org/bespilotniki-budut-osushhestvlyat-monitoring-radiacionnogo-fona-na-aes-fukusima-1>.



- [4] Наставление гидрометеорологическим станциям и постам / Вып. 12. Наблюдения за радиоактивным загрязнением природной среды. Под ред. К.П. Махонько. – М.: Гидрометиздат, – 1982. – 59 с.
- [5] Калиновский А.К., Краснов В.А., Огородников Б.И. Радиоактивные аэрозоли Фукусимы в Чернобыле // // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. – 2011. – Вип. 17. – С. 80–85.
- [6] <http://www.gpsgarmin.com.ua/modules.php?name=Pages&go=page&pid=11475>.
- [7] Авторское свидетельство СРСР № 257133, кл. G 01 N 1/24, 1968, Бюл. № 14 (72).
- [8] Башта Т.М. и др. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы. – М.: Машиностроение, – 1984, 424 с.
- [9] <http://www.cgo.kiev.ua/index.php?fn=hazard&f=structure>.
- [10] ФПП-15-1,5 ТУ 6-16-2813-84.

Babak S.V.¹, Iljin Ju.Ju.², Podreza S.M.³, Leschenko Ju.T.⁴, Kanchenko V.A.², Chepur N.L.²

¹ Scientific and Technical Center of the newest technologies of the National Academy of Science of Ukraine. Ukraine, Kiev

² The Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants. Ukraine, Kiev

³ PLANT 410 CA, State-owned Enterprise. Ukraine, Kiev

⁴ ERKAR, Private Enterprise. Ukraine, Kiev

GEOINFORMATION ENVIRONMENTAL MONITORING RADIATION ACCIDENTS

Article covers unmanned aerial vehicle (drone), isokinetic sampling device for radioactive aerosols and navigation radiometer for moving objects, that can be used for environmental monitoring in case of radiation accidents. Calibration results and experimental studies are also shown.

Keywords: *unmanned aerial vehicle (drone); environmental monitoring.*

- [1] http://nnm.ru/blogs/Etacom/snimki_vysokogo_razresheniya_aes_fukusima-1_vid_s_vozduha/.
- [2] <http://en.academic.ru/dic.nsf/enwiki/11550415#Design>.
- [3] <http://veteranychernobyl.org/bespilotniki-budut-osushhestvlyat-monitoring-radiacionnogo-fona-na-aes-fukusima-1>.
- [4] Nastavlenie gidrometeorologicheskim stancijam i postam / Vyp. 12. Nabljudeniya za radioaktivnym zagrjazneniem prirodnoj sredy. Pod red. K.P. Mahonko. – М.: Gidrometizdat, – 1982. – 59 p. (In Russian).
- [5] Kalinovskij A.K., Krasnov V.A., Ogorodnikov B.I. Radioaktivnye aerezoli Fukusimy v Chernobyle // // Problemi bezpeki atomnikh elektrostancij i Chornobilja. – 2011. – Vyp. 17. – P. 80–85. (In Russian).
- [6] <http://www.gpsgarmin.com.ua/modules.php?name=Pages&go=page&pid=11475>.
- [7] Avtorskoje svidetelstvo SRSR № 257133, kl. G 01 N 1/24, 1968, Bjul. № 14 (72) (In Russian).
- [8] Bashta T.M. etc. Gidravlika, gidromashiny i gidroprivody. – М.: Mashinostroenie, – 1984, 424 p. (In Russian).
- [9] <http://www.cgo.kiev.ua/index.php?fn=hazard&f=structure>.
- [10] FPP-15-1,5 ТУ 6-16-2813-84 (In Russian).