

# МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ БЕЗОПАСНОГО И НАДЕЖНОГО ВЫВОДА ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

**Л.Ю. Филимонюк**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*

Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65

E-mail: filimonyukleonid@mail.ru

**Ключевые слова:** беспилотные летательные аппараты, безопасность, объекты использования атомной энергии, вывод из эксплуатации, сложные системы.

**Аннотация:** В результате исследований разработан метод, применяемый для решения проблемы безопасного и надежного вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии. Его предполагается использовать в качестве математического обеспечения перспективных беспилотных систем, которые предназначены для комплексного инженерного обследования рассматриваемых сложных объектов. Для данных объектов выделены важные характеристики, а также выявлены причинно-следственные связи общий вид математических зависимостей между ними.

## 1. Введение

В настоящее время и в обозримой перспективе атомная промышленность и энергетика в России и в мире в целом характеризуется существенным увеличением объемов работ по выводу из эксплуатации (ВЭ) объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) вследствие исчерпания возможностей увеличения сроков их функционирования [1].

Важнейшим этапом стадии вывода из эксплуатации ОИАЭ является комплексное инженерное и радиационное обследование. Оно призвано обеспечить для целей проектирования наличие полной, подробной и достоверной информации о текущей конфигурации и техническом состоянии ОИАЭ.

Проблема эффективного осуществления вывода из эксплуатации ОИАЭ требует наличия эффективной технологии накопления, структурирования и передачи информации.

Выполнение практических работ по сбору исходных данных связано с повышенными дозовыми радиационными нагрузками на персонал, что является большим недостатком существующих систем [2].

В рамках прилагаемого исследования разработан метод и общий вид математической модели, положенные в основу перспективных беспилотных систем, позволяющих выполнять работы по выводу из эксплуатации объектов использования атомной энергии. Это позволит существенно снизить опасности, риски, материальные и временные затраты проведения данных работ.

## 2. Обзор и постановка проблемы, подходы к ее решению

Анализ журналов, входящих в международные базы научных публикаций показал, что проблема вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии является актуальной для исследователей.

Существуют целые кластеры периодических изданий, материалов конференций, патентов и монографий, посвященных данной проблематике. Например, «Decommissioning and Remote Systems» (США); «ANS Topical Meeting: Decommissioning, Decontamination, and Reutilization» (США); «Embedded Topical Meeting on Decommissioning and Remote Systems, Held at the American Nuclear Society» (США); «International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation» (Евросоюз); «Journal of Nuclear Medicine» (США); «Journal of Nuclear Materials» (Евросоюз); «IEEE Transactions on Nuclear Science» (США); «Nuclear Engineering and Design» (Евросоюз); «Nuclear Engineering and Technology» (Республика Корея) и многие другие.

Рассмотрим публикации, представляющий наибольший интерес в рамках проблемы вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии.

Например, в [3] описывается разработка многофункциональной беспилотной воздушной системы, которая предназначена для сбора и анализа данных после ядерной катастрофы. С ее помощью происходит наблюдение и анализ пространства в режиме реального времени.

В рамках исследования была использована интегрированная технология роя дронов, причем датчики фиксации радиационного загрязнения были установлены на небольших квадрокоптерах, а видеокамеры - на беспилотниках самолетного типа.

Авторы предлагают алгоритм, реализующий распределенное управление роем дронов. Беспилотники разделили область исследования, и отправились в назначенные места для проведения измерений. Мощность дозы гамма-излучения показания передавались на наземный пункт управления, обрабатывались и объединялись в единую карту в реальном времени.

Успешное совместное использование нескольких беспилотников позволило собрать данные на объекте, где было радиационное загрязнение. Более того, появилась возможность просмотра видео в реальном времени.

Одним из недостатков следует указать проблемы со стабильностью полета беспилотников самолетного типа, которые не наблюдались у квадрокоптеров.

Ключевым выводом из этого исследования является то, что технология роя дронов способна заполнить существующий технологический пробел при решении проблемы по сбору информации на объектах атомной энергии выводимых из эксплуатации.

Была продемонстрирована возможность дистанционного зондирования области излучения с помощью роя квадрокоптеров и объединения данных в единую карту заражения.

В [4] анализируются проблема радиационного загрязнения вследствие аварии 2011 года на атомной электростанции «Фукусима». Авторы рассматриваемой статьи предлагают использование беспилотного летательного аппарата, оснащенного лазерным дальномером, для создания трехмерного облака точек территории, на которое может быть нанесена карта радиационного загрязнения, полученная одновременно с помощью беспилотной авиационной платформы.

Благодаря использованию беспилотных летательных аппаратов, оснащенных системами обнаружения радиации и лазерными дальномерами, авторам удалось построить высокоточную модель территории площадью более 1000 квадратных метров.

С детекторами, установленными на одном блоке полезной нагрузки и записывающими с частотой 2 Гц, одного 15-минутного полета было достаточно, чтобы собрать все необходимые данные. Отдельно необходимо отметить преимущество применения такой системы – 3D-отображение почти в реальном времени изменения показателей загрязнения территории по соответствующей шкале.

Совершенствование данной технологии предполагает применение 32 лазеров, 3D-сканирующей системы LiDAR в дополнение к стандартной полезной нагрузке обнаружения излучения для создания трехмерного изображения со сверхвысоким разрешением, использование планов и топологических карт зданий и мест хранения отходов, как для мониторинга, так и для визуализации загрязнения в процессе вывода из эксплуатации соответствующих объектов.

Использование высокопроизводительных вычислений позволяет отслеживать радиационные загрязнения и создавать высокоточные модели излучения, позволяющие точно определить источник такого загрязнения. Использование трехмерного радиационного картографирования с высоким разрешением может быть применимо не только при восстановлении после аварий, но и может оказаться весьма полезным для более общего вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии.

Существуют способы построения картографии для демонтажа ядерной установки, включающие в себя следующие этапы:

- разработка карты процесса демонтажа ядерного объекта,
- разработка ядерной схемы по данным радиационного анализа,
- преобразование картографии в логистическую модель с дискретизацией моделирования потока событий,
- интеграция в логистическую модель модели расчет доз, позволяющей определить полученные дозы персоналом в процессе демонтажа,
- имитация сценария процесса демонтажа из логистической модели,
- оптимизация указанного плана мероприятий, где критерием оптимизации выступает минимум полученной дозы,
- построение карты по оптимальному сценарию.

Преимущества рассматриваемого способа, заключаются в следующем.

Сделать более достоверной начальную проработку сценария демонтажа, что включает в себя общее определение затрат, планирование использования ресурсов, а также определение всех действий, направленных на обеспечение радиационной безопасности.

С самого начала организуются планы мероприятий по демонтажу с учетом минимизации риска облучения.

Получается конфигурация потока, которая позволит полностью утилизировать отходы в кратчайшие сроки.

Минимизация отклонений от программ, определенных в предпроектных исследованиях.

Возможность пересмотра планов мероприятий во время демонтажа.

Важнейшим недостатком данного подхода является то, что в ходе указанных работ приходится привлекать персонал.

### **3. Общий вид математической модели**

В рамках предлагаемого исследования применяются только беспилотные летательные аппараты, что позволяет преодолеть недостатки существующих систем.

Далее описывается общий вид математической модели, применяемой в данных беспилотных системах.

В результате анализа опыта вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии можно выделить для изучения следующие характеристики.

$X_1$  – значение амбиентного эквивалента дозы источника в точке пространства.

$X_2$  – интенсивность поверхностного и объемного радиоактивного загрязнения в зависимости полнотелый или пустотелый источник излучения.

$X_3$  – номер источника излучения.

$X_4$  – парциальные доли гамма-квантов с энергией в спектре загрязняющего объем или площадь радиоактивного изотопа.

$X_5$  – номер барьера на траектории.

$X_6$  – объем или площадь источника излучения.

$X_7$  – геометрическая толщина барьера на траектории.

$X_8$  – эквивалентное значение дозового фактора накопления барьеров для траектории.

$X_9$  – расстояние от центра источника излучения до точки измерения.

$X_{10}$  – эквивалентная оптическая толщина барьеров на траектории.

$X_{11}$  – линейный коэффициент ослабления гамма-квантов.

$X_{12}$  – значение коэффициента пересчета флюенса гамма-квантов в амбиентный эквивалент.

Причинно-следственные связи между указанными характеристиками отражены на рис. 1.

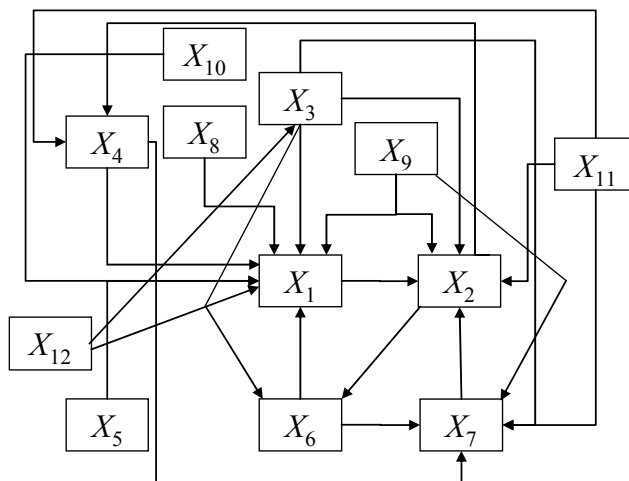


Рис. 1. Граф причинно-следственных связей между характеристиками системы.

На основе данного графа в общем виде построена система уравнений, исходя из решения которой предполагается определять значения характеристик системы.

$$\frac{dX_1(t)}{dt} = f_1 (X_3(t), X_4(t), X_5, X_6(t), X_8, X_9(t), X_{10}, X_{11}, X_{12}, t);$$

$$\frac{dX_2(t)}{dt} = f_2 (X_1(t), X_3(t), X_7(t), X_9(t), X_{11}, t);$$

$$\frac{dX_3(t)}{dt} = f_3 (X_{12}, t);$$

$$\frac{dX_4(t)}{dt} = f_4 (X_2(t), X_{11}, t);$$

$$\frac{dX_6(t)}{dt} = f_6 (X_2(t), X_3(t), t);$$

$$\frac{dX_7(t)}{dt} = f_7 (X_3(t), X_4(t), X_6(t), X_9(t), X_{11}, t);$$

$$\frac{dX_9(t)}{dt} = f_9 (t).$$

## 4. Заключение

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

Существующие подходы к применению дронов, которые основаны на применении сигналов глобального или локального позиционирования имеют ряд ограничений для использования их на объектах использования атомной энергии, выводимых из эксплуатации.

Во-первых, большие размеры и сложная геометрия объектов атомной энергии, выводимых из эксплуатации, предполагают использование большого количества дронов, функционирующих по определенному согласованному плану, чтобы снизить время обследования всех помещений, а также для обеспечения надежности и резервирования на случай выхода из строя отдельных аппаратов.

Во-вторых, сигналы комплексов глобального позиционирования зачастую недоступны в некоторых помещениях на объектах использования атомной энергии.

В-третьих, физические свойства материалов, из которых сделаны помещения объекта использования атомной энергии и объекты внутри них, могут препятствовать применению систем локального позиционирования.

В-четвертых, применение систем локального позиционирования в помещениях, подверженных загрязнению достаточно затратно.

Поэтому для вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии целесообразно применение систем, которые позволяют осуществлять геометрическое, инженерное, радиационное и т.д. обследование помещений на объектах использования атомной энергии с помощью современных информационных технологий.

## Список литературы

1. Муратов О.Э., Тихонов М.Н. Вывод из эксплуатации энергоблоков атомных электростанций: пути решения проблемы // Экология промышленного производства. 2008. № 4. С. 50-60.
2. Семенов С.Г., Крамаренко Л.А., Чесноков А.В. Анализ критериев оптимизации мероприятий по радиационной защите персонала при выводе из эксплуатации исследовательского реактора МР // Проблемы анализа риска. 2016. № 2. С. 72-79.
3. Kopeikin Andrew N., Heider Samuel A., Larkin Dominic M. and etc. Unmanned Aircraft System Swarm for Radiological and Imagery Data Collection // AIAA Scitech. 2019. DOI: 10.2514/6.2019-2286.
4. Martin P.G., Kwong S., Smith N.T., and etc. 3D unmanned aerial vehicle radiation mapping for assessing contaminant distribution and mobility // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2016. No. 52. P. 12-19.