

ОЦЕНКА ОБЪЕМОВ ОБРАЗОВАНИЯ РАО ОТ ВЫВОДА ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

Т. А. Александрова, А. Ю. Иванов, Ин. И. Линге, Д. М. Лунов, Е. А. Савельева,
А. А. Самойлов, В. Б. Уткин

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 12 августа 2020 г.

В настоящий момент активно проводятся работы по выводу из эксплуатации объектов использования атомной энергии, и повышение эффективности их реализации является ключевой задачей планирования работ. Поскольку основной расходной частью таких работ является обращение с образующимися радиоактивными отходами, важно провести достоверную оценку их объемов. Задача настоящей работы – демонстрация методики оценки объемов РАО, образующихся при выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии, на основании данных их комплексного инженерного и радиационного обследования с использованием цифровых информационных моделей.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, вывод из эксплуатации, информационная модель, федеральная целевая программа, эффективность.

Одной из основных составляющих стоимости работ при реализации проекта вывода из эксплуатации (ВЭ) объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) является обращение с образующимися при этом радиоактивными отходами (РАО). Достоверная оценка этих объемов необходима для эффективного планирования и использования финансовых ресурсов, а также развития инфраструктуры обращения с РАО, включая мощности по их захоронению. В настоящее время, когда результаты комплексного инженерного и радиационного обследования объекта (КИРО) есть только по относительно небольшой части объектов, использование которых в дальнейшем по проектному назначению не предполагается, в основе планирования лежат существенно упрощенные оценки, полученные, в частности, по методике оценки финансовых обязательств по ВЭ в рамках отчетности в

соответствии с Международными стандартами финансовой отчетности (МСФО). Отметим, что если в случае применения данных оценок для всей совокупности объектов погрешности частично компенсируют друг друга, то в случае их применения к отдельным объектам могут наблюдаться значительные расхождения между предварительно оцененными объемами РАО и фактически полученными при проведении работ по ВЭ. Это существенным образом усложняет задачу системного планирования работ отрасли в целом, особенно с учетом имеющихся ограничений по финансированию этих работ. Следовательно, в рамках системной организации работ должна непременно ставиться задача поэтапного уточнения оценок объемов образования РАО по основным объектам, на которых работы по ВЭ предполагаются в краткосрочной и среднесрочной перспективе.

Исходные данные для оценки объемов образования РАО

Основным источником исходных данных для определения объемов образования РАО являются результаты КИРО, отражающие картину загрязнения оборудования и строительных конструкций зданий и сооружений. Отчеты по КИРО в части радиационных характеристик, как правило, содержат первичную информацию по радиационному загрязнению (точки измерений, измеренные радиационные характеристики элементов), а также результаты ее обработки. В качестве радиационных характеристик элементов могут быть представлены различные величины, полученные как в результате прямых измерений, так и расчетно-экспериментальным методом: удельная активность по конкретным радионуклидам или по виду излучения (альфа, бета), мощность дозы ионизирующего излучения на определенном расстоянии, плотность потока частиц (альфа и бета) и др. В качестве результатов обработки могут быть составлены картограммы загрязнений по различным измеренным величинам, а также определены объемы образования РАО и промышленных отходов, содержащих повышенное количество радионуклидов.

Отметим также, что, несмотря на требование о представлении оценок объемов образования РАО по результатам КИРО [1, 2], фактически такие оценки могут быть даны только с использованием каких-либо предположений о технологиях демонтажных и дезактивационных работ и организации радиационного контроля объектов и материалов. Зачастую данные, представленные в рамках КИРО, не содержат такую информацию, и она может быть лишь частично восстановлена по косвенным признакам, что затрудняет последующую переоценку объемов РАО при проектировании работ по ВЭ, в случае если предполагаются иные технологии.

До введения рекомендаций по разработке программы и проведения КИРО (РБ-159-19, РБ-160-19) отсутствовали единые подходы к его планированию и проведению. В результате возникло существенное различие как по детальности, так и по представлению данных в отчетах. В табл. 1 и 2 приведены данные по детальности КИРО для объектов двух площадок: сублиматного производства (СП) АО «АЭХК» и радиохимического завода (РХЗ) АО «СХК».

Как видно из представленных данных, даже в рамках одной площадки детальность при проведении КИРО разных объектов существенно отличается. При этом насыщенность данными

Таблица 1. Статистика данных обследования объектов АО «АЭХК»

Здания/сооружения	Строительный объем, м ³	Точки измерения		Шурфы		
		полы	стены	стены	полы	грунт
327	15 754	260	93	37	16	24
303	82 300	332	-	1	1	17
301	143 600	939	3	3	3	2
320Б	4 076	84	260	4	4	14
газоходы	85 000	446	223	21		38

Таблица 2. Статистика данных обследования объектов АО «СХК»

Здания/сооружения	Строительный объем, м ³	Точки измерения		Шурфы		
		полы	стены	стены	полы	грунты
227	9016	42	74	-	-	-
201	438 365	873	-	-	-	-
252	364 696	184	-	-	-	-

отчета по зданию 327 АО «АЭХК» не объясняется его загрязненностью. Основное технологическое здание (301) АО «АЭХК», обладая на порядок большим строительным объемом, имеет существенно меньшее количество проб (шурфов), дающих представление о глубине загрязнения строительных конструкций здания.

К очевидным недостаткам обследования зданий РХЗ АО «СХК» следует отнести отсутствие в отчете данных об определении глубины проникновения загрязнения в материалы строительных конструкций. В то же время такие исследования выполнялись при обследовании строительных конструкций сублиматного производства АО «АЭХК».

Также в отчетах о КИРО РХЗ АО «СХК» и СП АО «АЭХК» не представлены координаты мест проведения измерений в помещениях зданий. Если в отношении объектов СП АО «АЭХК» они могут быть восстановлены на основе картограмм, то для объектов АО «СХК» в отчетах приводится только диапазон изменения измеряемой величины по помещениям или ее среднее значение.

Понятно, что использование неполных данных не позволяет провести точную оценку объемов образования РАО. С другой стороны, проведение дополнительных обследований с целью определения характера радиоактивного загрязнения, в том числе его распределение по глубине, является весьма трудоемким и длительным процессом. Оптимальный путь — это разумное увеличение детальности КИРО с одновременным

использованием аналитических методов, которые позволят получить адекватную оценку объемов и характеристик РАО на основе ограниченного количества данных.

Корректность оценки объемов образования РАО при проведении работ по ВЭ является ключевым вопросом при планировании мероприятий как по обращению с РАО и передаче их на захоронение, так и выводу из эксплуатации объекта в целом. Поэтому при анализе объемов РАО, которые будут образовываться в результате проведения работ по ВЭ, необходимо также проводить оценку неопределенности подобных расчетов для формирования возможных разбросов объемов необходимых работ и затрат. Наблюдаемые в настоящий момент отклонения прогнозных оценок от фактического образования достаточно велики. Так, при выводе из эксплуатации исследовательского корпуса «Б» АО «ВНИИНМ» фактический объем образования РАО превышал проектный почти в 3 раза [3], а разница стоимости обращения с ними составляла порядка 1 млрд рублей. Возникают и обратные ситуации.

Информационные модели как инструмент оценки количества образования РАО

Существенно повысить качество оценок объемов образования РАО позволяет использование информационных моделей (BIM моделей) объектов в совокупности с алгоритмами восстановления пространственных данных о загрязнениях.

Информационное моделирование, являясь набором современных инструментов и методов проектирования промышленных объектов, представляется критически важным для работ по ВЭ [4]. Подчеркнем главные аспекты, реализуемые в информационной модели, на необходимость использования которых ссылается международный опыт работ по ВЭ. Во-первых, разработка модели для каждой стадии жизненного цикла (ЖЦ) объекта и ее последовательная передача от проекта сооружения до проекта вывода из эксплуатации (в т. ч. сохранение и передача исходной проектно-сметной документации на все последующие стадии ЖЦ объекта). Во-вторых, это сохранение важной для эксплуатации и последующего ВЭ информации по объекту, что включает:

- сведения как о нормальном ходе технологических процессов, так и неполадках, авариях и происшествиях на объекте (т. н. история эксплуатации);
- информацию по проведенным КИРО и инженерным обследованиям;

- информацию по изменениям и реконструкции объекта или его частей.

В-третьих, информационная модель, являясь средой общих данных для всех участников проекта ВЭ, представляет собой технологически гибкий инструмент управления проектом. Это обеспечивает технологическую прозрачность механизмов внесения изменений в проект ВЭ, контроль строительного объема (объема демонстража), доступность данных по КИРО и объему образования РАО для участников проекта.

Существенным национальным опытом, представленным в литературе, на сегодня является применение имитационных информационных моделей главным образом для задач отработки операций демонтажа кладки ПУТР [5, 6] и ряда других целей [7]. Данные работы пересекаются с международным опытом отработки задач демонтажа загрязненного оборудования ядерных объектов [8, 9]. При этом рассмотрение задач оценки объемов РАО при ВЭ с использованием информационного моделирования в отечественной литературе отсутствует.

В данной работе рассматривается использование информационного моделирования для оценки объемов образования РАО при ВЭ объектов площадки СП АО «АЭХК», которое заключалось в решении ряда задач от создания модели объекта площадки сублиматного производства АО «АЭХК» «как есть» (задача реинжиниринга объекта) до создания 5D-модели проекта ВЭ.

Конечным результатом информационного моделирования стал набор цифровых информационных моделей (ЦИМ): ЦИМ №1 — модель данных лазерного сканирования, ЦИМ №2, ЦИМ №3 — информационные модели с различным уровнем проработки атрибутивной информации и оборудования, ЦИМ №4 — 5D-модель проекта ВЭ.

Для уточнения текущего состояния объектов и разработки ЦИМ №1 и ЦИМ №2 площадки СП АО «АЭХК» в 2019 году были проведены обследования и лазерное сканирование зданий и сооружений. Работы выполнялись в производственных помещениях, где располагаются технологическое оборудование и инженерные системы. Натурные съемки и измерения технологией наземной лазерной съемки проведены с использованием лазерного сканера Leica Geosystems RTC360.

При обработке исходных данных лазерного сканирования использовалось программное обеспечение Leica Cyclone Register. Для обратного реинжиниринга (воссоздания по данным лазерного сканирования) и создания информационной модели использовано программное

обеспечение Autodesk среды информационного моделирования Revit 2019. Кроме того, для редактирования параметров семейств элементов модели выгрузки и последующей загрузки в модель измененных параметров оборудования, данных поверхностного загрязнения, интерполированных точек загрязнения и построения в модели картограмм загрязнения поверхностей было разработано дополнительное программное обеспечение (скрипты). Это позволило автоматизировать процессы корректировки атрибутивных данных элементов модели и процессы расчета и построения картограмм загрязнения.

Полученная в результате выполнения комплекса работ информационная модель проекта ВЭ представляет собой комплексную трехмерную модель, включающую ключевые объекты, важные для ВЭ, описание атрибутивной информации и данные КИРО. Построение модели основано на общепринятом подходе к определению уровня проработки модели (LOD) [10], включающей уровень проработки геометрии (LOG) и уровень проработки информации (LOI). Существенным моментом является проработка геометрии элементов модели для задач демонтажа и определения объема образования РАО. Так, авторам представляется рациональным, что для технологического оборудования, которое в последующем будет демонтировано, достаточно определять ключевые геометрические контуры только для задачи визуализации и примерного представления объема (рис. 1), а для архитектурных элементов (стена, перекрытие), напротив, необходимо предъявлять более детальные требования к геометрии элементов модели — до погрешности 0,1 метра в расхождении

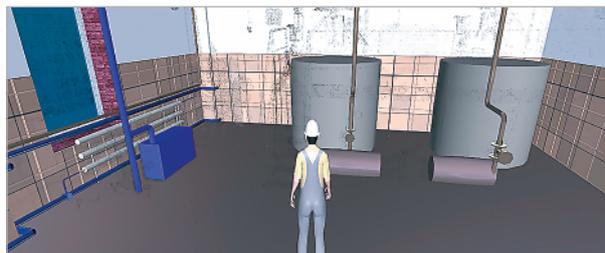


Рис. 1. Информационная модель. Уровень проработки геометрии технологического оборудования

с моделью «как есть» (по данным лазерного сканирования).

К ключевым объектам информационной модели, важным для ВЭ, отнесены:

- а) архитектурно-строительная часть зданий и сооружений, включая: строительные блоки, отметки, планировка помещений, несущие бетонные и металлические конструкции, площадки обслуживания, лестничные пролеты, трубы, технологические эстакады;
- б) элементы отделки помещений (штукатурка, лакокрасочное покрытие, облицовочные материалы, материалы покрытия полов);
- в) инженерные сети, включая системы отопления и вентиляции, системы водоснабжения и канализации;
- г) основное электросиловое и технологическое оборудование (рис. 2).

Реализованные в модели элементы радиационного контроля («точка радиационного контроля/замера», «картограмма загрязнений»), содержащие радиационные характеристики, которые в совокупности с радиационными характеристиками, записанными в составе атрибутивных данных элементов модели, обеспечивают

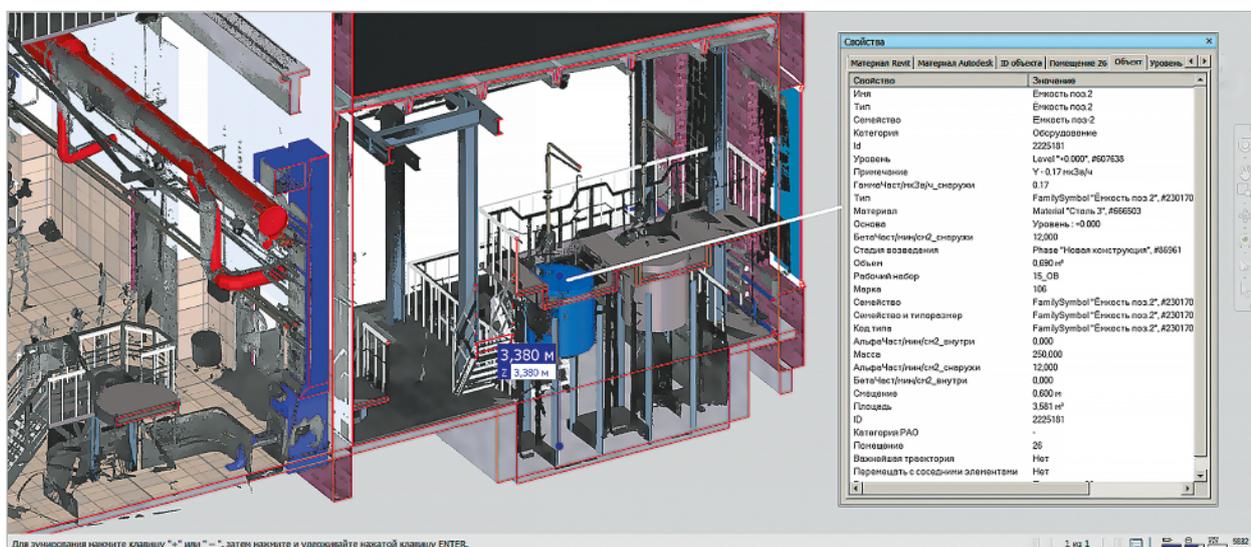


Рис. 2. Уровень проработки геометрии ключевых объектов, важных для ВЭ, на примере информационной модели здания 327

возможность расчета объемов образования РАО по категориям (материал, тип и категория оборудования или архитектурного элемента). Информационная модель формирует настраиваемые отчеты — спецификации по элементам и ведомости объемов работ ВЭ.

Вне зависимости от уровня проработки геометрии, в условиях сложной и неоднородной радиационной обстановки, а также недостаточности данных по истории эксплуатации объекта, качество и полнота результатов КИРО вместе с атрибутивными данными элементов модели определяют точность оценок объема образования РАО.

Последовательность расчета объема образования РАО с применением информационной модели включает в себя следующие этапы:

- а) создание семейств для представления в модели элементов КИРО,
- б) полуавтоматизированное внесение данных КИРО в модель,
- в) интерполяция данных КИРО,
- г) построение элементов картограмм с использованием результатов интерполяции.

На первых этапах выполняется внесение в модель данных о результатах измерений уровней загрязнения и распределение точек измерений в соответствии с картограммами и таблицами, приведенными в отчетах КИРО. Каждой точке при этом присваиваются соответствующие атрибуты: порядковый номер, ID-адрес, значения альфа-, бета-, гамма-загрязнения, номер помещения. По результатам внесения данных формируются массивы точек в модели (рис. 3).

Авторами отмечается, что в ближайшей перспективе данные КИРО должны быть оцифрованы. Это означает, что формат представления данных КИРО (в т. ч. элементов информационной

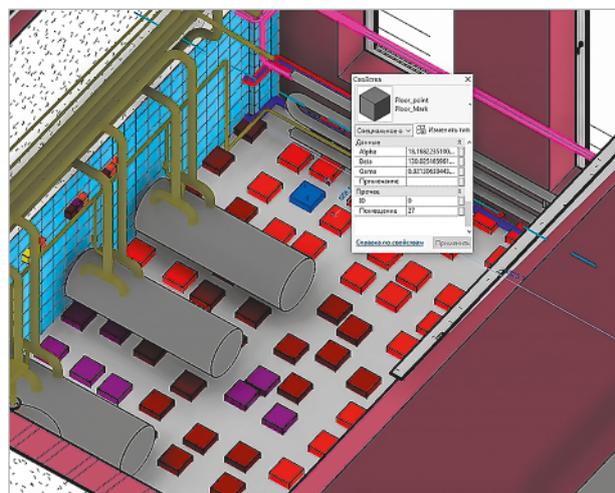


Рис. 3. Отражение в модели точек измерения радиационного загрязнения полов

модели «точка радиационного контроля/замера», «картограмма загрязнений») должен быть унифицирован, а стандарт процедуры проведения обследования содержать единые правила описания в рамках единой среды, в перспективе — цифрового двойника [11]. Это сильно повлияет на так называемую цифровую трансформацию в обработке данных радиационного обследования внутри помещений. Во-первых, это даст возможность интегрированного накопления результатов КИРО, т. е. формирование базы данных, что технически реализует механизм системы управления и сохранения знаний (KMS) по объекту [12], а во-вторых, повысит доступность информации ключевым заинтересованным участникам — проектным организациям, регулирующим органам, подрядным и научным организациям.

Для использования данных КИРО при оценке объемов и характеристик РАО придется проводить их интерполяцию. Эта необходимость вызвана:

- неравномерностью распределения точек измерений по поверхностям, а также необходимостью оценки характеристик и объемов различных групп РАО и промышленных отходов;
- необходимостью разбиения РАО по группам в соответствии с последующими методами обращения и характеристиками РАО после их кондиционирования.

В целом возможно применение различных методов интерполяции, достаточно подробно они рассмотрены в [13]. В рамках разработки ЦИМ №3 СП АО «АЭХК» при выборе метода интерполяции учитывались следующие особенности результатов КИРО:

- относительно малое количество точек измерений в конкретном помещении (в среднем для помещения характерно примерно 20 измерений, однако есть помещения, где их может быть больше 100 или всего 5);
- наличие выколотых (одноточечных) пиков на общем фоне низких значений;
- неравномерное распределение точек по поверхности.

К результатам интерполяции предъявлялись физически понятные требования, что они не должны:

- демонстрировать расползания выколотых пиков, но при этом, чтобы сами пики не сглаживались и пространственно не смещались;
- образовывать неожиданные всплески повышенных значений, так называемые артефакты.

Чтобы удовлетворить этим требованиям, для интерполяции использована треугольная сетка, построенная на основе триангуляции Делоне [14].

Такая сетка позволяет включить в результат все исходные данные в неискаженном виде, так как они являются ее узлами. Алгоритм построения интерполяционной сетки кратко можно описать следующим образом:

- построение исходной триангуляции Делоне из набора исходных точек и углов помещения;
- вычисление площадей треугольников и средней площади;
- выделение треугольников с площадью больше средней и включение в каждый из них новой точки, равноудаленной от всех углов;
- проверка на минимальность тупоугольных треугольников и перестроение системы при необходимости.

Проведение 7–8 итераций позволяло достигать равномерной и достаточно плотной интерполяционной сетки.

Для прямоугольных помещений выпуклый многогранник совпадает с прямоугольником, построенным по углам помещения, и, соответственно, вся площадь помещения попадает в область интерполяции. В помещениях непрямоугольной формы (Г- и Т-образных) генерировалась сетка на выпуклом многоугольнике (рис. 4), а потом вырезались ненужные области (рис. 5).

Пример расчета и построения полей загрязнения горизонтальных поверхностей по данным интерполяции представлен на рис. 6.

Построенные таким образом интерполяции после загрузки в информационную модель (не заменяя собой результаты фактических измерений) позволяют формировать расширенную ведомость зон загрязнений объектов по задаваемым пользователем граничным значениям.

Отметим, что для картограмм загрязнения в целом по объекту уровень корреляции между различными компонентами загрязнения

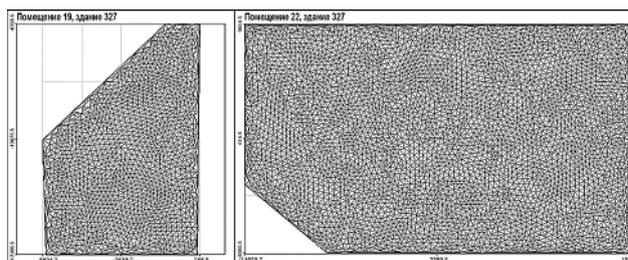


Рис. 4. Пример исходной сгенерированной треугольной сетки для Г-образных помещений

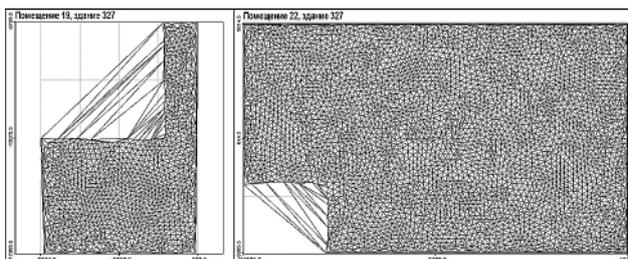


Рис. 5. Пример треугольной сетки для Г-образных помещений

повышается (рис. 7) по сравнению с картограммами отдельных помещений (рис. 6).

Включение показателей радиационных характеристик в информационную модель, помимо существенного улучшения восприятия данных, позволяет проводить их уточнение по итогам дополнительных измерений, в случае их проведения, и повысить надежность сохранности данных. Кроме того, еще одним перспективным применением информационного моделирования является реализация двухуровневой схемы планирования проведения КИРО. Сначала проводится КИРО первого этапа, а после обработки его результатов определяется перечень необходимых дополнительных измерений в рамках «уточняющего» КИРО. Для этого, конечно,

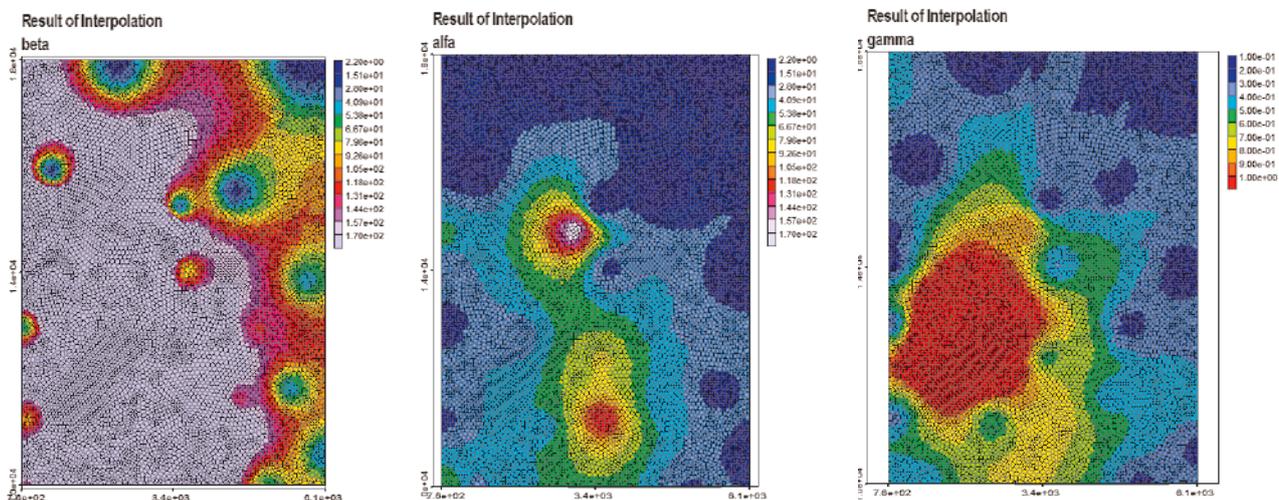


Рис. 6. Картограмма α - и β -загрязнения пола и МЭД

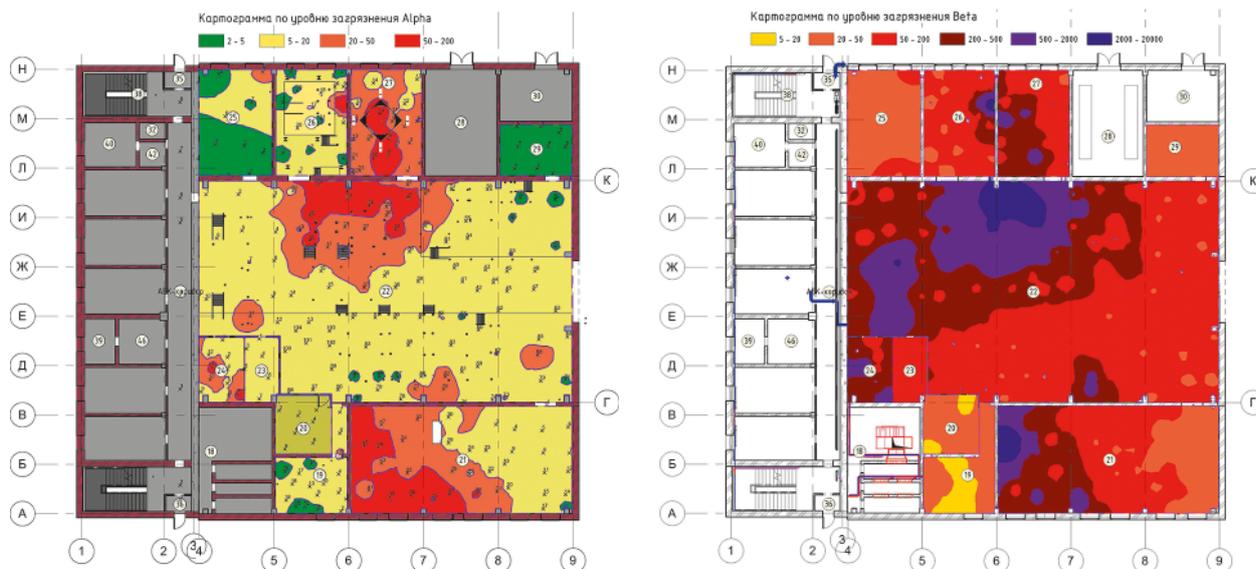


Рис. 7. Картограммы плотности потока α -частиц (слева) и β -частиц (справа)

должны быть своевременно подготовлены информационные модели для рассматриваемых объектов.

Аналитические подходы к оценке объемов РАО и промышленных отходов с повышенным содержанием радионуклидов

Ранее отмечалось, что для формирования оценок количества образования РАО следует учитывать предполагаемые технологии дезактивации. Кроме того, для оценки затрат на последующее обращение с РАО следует также провести разделение отходов на группы не в соответствии с формальными границами категорий по активности (ОНРАО, НАО, САО, ВАО), а по границам, определяющим применение той или иной цепочки обращения. Например, рассматривая технологическую схему обращения с загрязненным металлом (рис. 8), понятно, что следует определить следующие границы «чистый/грязный

металл», «чистый/грязный металл после жидкостной дезактивации», «чистый/грязный металл после пирометаллургической переработки».

Для определения соответствующих границ следует использовать один из показателей, по которым построена интерполяция результатов КИРО, связав их с удельной активностью, на основании которой и определяется возможность неограниченного/ограниченного использования или итоговый класс удаляемых РАО. Для разных материалов эти границы будут разными, в зависимости от ряда факторов: плотность, технология дезактивации (степень дезактивации), вид загрязнения (поверхностное или заглубленное) и т. д.

Для этих целей можно использовать экспериментальные данные измерений соответствующих показателей для различных материалов при проведении КИРО (в случае их наличия) или результаты расчетных оценок. Приведем ниже пример для бетонных поверхностей.

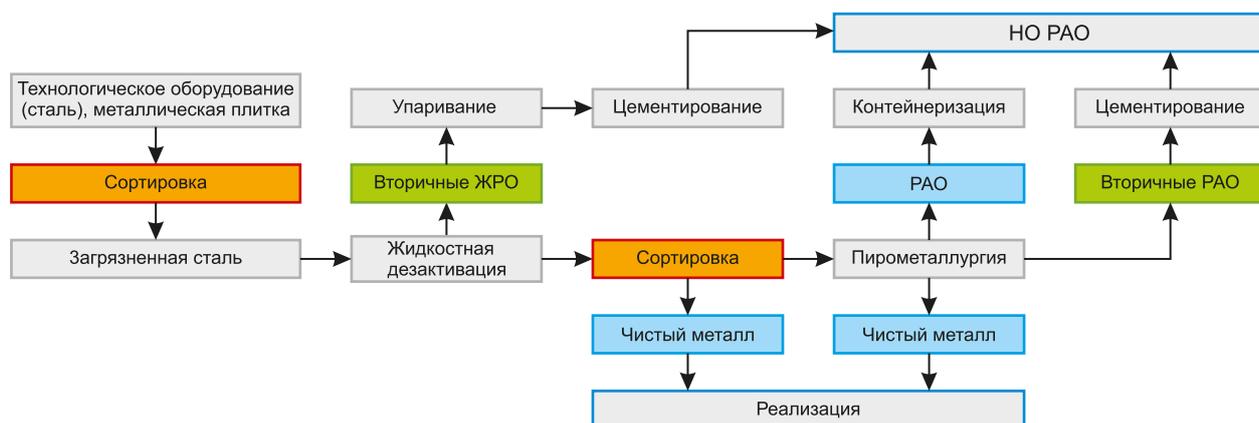


Рис. 8. Технологическая карта обращения с металлом (оборудование и плитка)

Поскольку для пористых материалов (в том числе бетона) загрязнение имеет заглубленный характер, на первом этапе проводится оценка его профиля. С этой целью были систематизированы данные по измерению загрязненности бетонных конструкций объектов СП АО «АЭХК» в шурфах с нормированием величины плотности потока частиц на поверхности. Нормированные результаты были аппроксимированы и определена их зависимость от глубины взятия пробы. Выражение, описывающее изменение плотности потока бета-частиц в зависимости от глубины взятия пробы материала бетонных конструкций, выглядит следующим образом:

$$F_{\beta} = 1,3 \cdot e^{-0,6 \cdot x}, \quad (1)$$

где x — глубина размещения измеряемой поверхности, мм.

В дальнейшем с учетом толщин отобранных проб и значений измерений удельной активности материала можно определить ее зависимость от плотности потока частиц. На рис. 9 представлен результат аппроксимации зависимости удельной активности бетона от поверхностного загрязнения, полученный на основе систематизации данных отчетов КИРО для объектов СП АО «АЭХК». В качестве показателя радиационного загрязнения были использованы данные по плотности потока бета-частиц, так как данная величина менее подвержена искажениям вследствие эффектов экранирования.

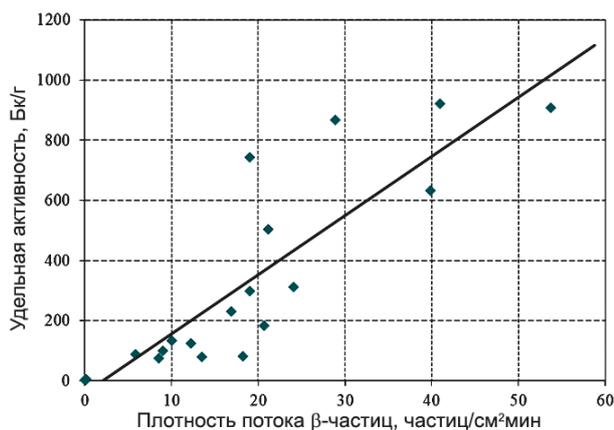


Рис. 9. Зависимость удельной активности от плотности потока бета-частиц от поверхности бетона

Граничные значения для металлической облицовки строительных сооружений могут быть оценены в первом приближении на основе

гипотезы о поверхностном загрязнении материала путем простого пересчета плотности потока частиц в удельную активность с учетом плотности и толщины облицовочного материала. Полученные в результате оценок диапазоны для металлической облицовки приведены в табл. 3.

Таблица 3. Граничные значения категорий РАО для демонтированной металлической облицовки

Материал	Чистый/грязный металл, част./см²·мин	Чистый/грязный металл после жидкостной дезактивации, част./см²·мин	Чистый/грязный металл после пирометаллургической переработки, част./см²·мин
Металл	50	20000	2000000

Далее при помощи разработанного скрипта на основе информационной модели подготавливаются спецификации, содержащие данные по площадям загрязнения для каждого материала в соответствии с заданными границами. Затем на основании данных спецификаций определяются объемы РАО, подлежащих переработке по той или иной технологической цепочке.

Описанный выше подход применим только в случае, если исходные данные КИРО позволяют провести их интерполяцию. В противном случае, например, при малом количестве точек измерений, реализовать такой подход невозможно. В рассматриваемом примере это относится к данным по загрязнению стен, а также подстилающих (относительно облицовки) слоев строительных конструкций, для которых имеются лишь единичные измерения по помещениям (в ряде случаев данные отсутствуют). В такой ситуации выход может быть найден посредством установления взаимного соотношения между распределениями загрязнений поверхности пола и иных поверхностей по более широкой совокупности данных (например, зданию в целом) с последующей оценкой распределения загрязнения соответствующих поверхностей на основе результатов измерения загрязненности пола в конкретных помещениях.

Например, в случае когда распределение результатов измерения загрязнения поверхностей близко к нормальному, можно применять подход, основанный на использовании функции Лапласа, которая оценивает вероятность попадания случайной величины, распределенной по нормальному закону, в заданный интервал значений. Такой способ позволяет оценить долю

поверхности, загрязнение которой лежит в заданном диапазоне

$$P(\alpha \leq x \leq \beta) = \Phi\left(\frac{\alpha - \bar{x}}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{\beta - \bar{x}}{\sigma}\right), \quad (2)$$

где α и β — интервал значений загрязнения;
 \bar{x} — среднее значение загрязнения пола/стены помещения;
 σ — среднеквадратическое отклонение величины загрязнения.

Далее, зная характер зависимостей двух поверхностей, можно определить долю поверхности, которая будет соответствовать заданному диапазону загрязнений. Согласно сложившейся практике КИРО, детальность данных о загрязнении поверхности пола значительно выше по сравнению с детальностью данных по загрязнению стен или заглубленных слоев. Происхождение загрязнений вертикальных и горизонтальных поверхностей различно. Горизонтальные поверхности загрязнены вследствие проливов или рассыпания радиоактивных сред, вертикальные — за счет газовой-аэрозольного загрязнения. Тем не менее, учитывая длительное время формирования загрязнения, проведение плановых работ по дезактивации поверхностей, а также газовой-аэрозольный перенос загрязнения, на достаточно большом объеме помещений и объектов должна присутствовать взаимосвязь между уровнем загрязнения горизонтальных и вертикальных поверхностей. Следовательно, данные по загрязнению поверхности пола возможно использовать для оценки распределения загрязнения иных поверхностей, предварительно определив соотношения между соответствующими распределениями. Статистический анализ данных КИРО объектов СП АО «АЭХК» показывает, что в целом распределения загрязнений иных поверхностей имеют схожий характер, при этом стены и подстилающие слои имеют меньший средний уровень загрязнения и меньший разброс значений.

Напомним, что итоговые объемы и характеристики РАО зависят от принятых технологий дезактивации и обращения с ними. Если рассматривать задачу определения оптимальной системы обращения с РАО от ВЭ, то для ее формирования следует провести экономический анализ с рассмотрением альтернативных вариантов. Поскольку стоимостные оценки должны учитывать капитальные затраты на сооружение установок различного типа и стоимость собственно переработки, то для различных объемов и характеристик РАО оптимальными могут

оказаться разные комбинации технических решений. Если объем РАО невелик, то можно применять упрощенные методы переработки с использованием имеющихся установок, либо привлекать для обращения с РАО специализированные организации. Если объем РАО значителен, то создание установок глубокой переработки на площадке может быть оправдано, несмотря на необходимость дополнительных затрат на их сооружение.

Следовательно, возникает необходимость сравнительного анализа нескольких вариантов технологических решений, каждому из которых будут соответствовать свои объемы образования и характеристики РАО, а также стоимостная оценка. Полноценное решение данной задачи без создания каких-либо инструментов автоматической (хотя бы частично) оценки — невозможно.

Еще одной возможной областью применения совокупности информационных моделей и аналитических методов является оценка неопределенности полученных результатов. Отметим, что в рассматриваемом случае она достаточно существенна. Проведенный регрессионный анализ для оценки неопределенности выполненных расчетов на примере РАО в виде измельченного бетона показал, что при оценке объема она составляет ~30% только за счет перехода от плотности потока частиц к удельной активности материалов. Но, тем не менее, наличие таких оценок позволяет значительно увеличить обоснованность планов. В случаях, когда за неимением точных данных в РАО «записывается» фиксированная часть строительных конструкций (от 100% до 10%), об обоснованном планировании говорить нельзя.

Отметим, что полученные неопределенности оценок могут и должны быть значительно уменьшены по мере накопления информации по объектам как в результате проведения уточняющих дополнительных измерений, так и в ходе работ по ВЭ. Здесь опять же основополагающую роль играют информационные модели, которые могут в таком случае являться основой для создания базы данных с целью накопления и последующей обработки результатов, получаемых на всех этапах работ.

Заключение

Определение объемов образования РАО и оптимальной схемы обращения с ними является одной из основных задач на этапе подготовки к ВЭ. Эти оценки должны стать основой для проектных решений по обращению с РАО,

в дальнейшем переходя в планы Национального оператора по обращению с РАО при создании инфраструктуры для их захоронения. Необходимость экономических и вариантных оценок объемов образования РАО обуславливает значимость применения современных подходов к решению задач по подготовке к ВЭ и необходимость применения современных инструментов.

Предложенный метод оценки образования РАО от ВЭ ОИАЭ на основе информационных моделей может эффективно использоваться при планировании и проектировании, поскольку позволяет создать сценарий проведения практических работ по ВЭ и не только спрогнозировать объем РАО, который при этом будет образован по каждому конкретному сценарию, но также категорировать РАО с учетом дальнейшего обращения с ними. Практический опыт проведения анализа КИРО объектов площадки сублиматного производства АО «АЭХК» и разработка информационных моделей дают основание считать целесообразным рассмотрение этих двух аспектов подготовки к ВЭ как дополняющих друг друга, а при проведении обследований придерживаться следующих рекомендаций:

- разработку информационной модели необходимо выполнять на этапе, предшествующем проведению КИРО ОИАЭ. Это позволит систематизировать процесс накопления и хранения данных об ОИАЭ. Проведение КИРО должно осуществляться с учетом результатов информационного моделирования. Например, результаты информационного моделирования зданий 301 и 303 СП АО «АЭХК» выявили, что объем радиационного обследования стен этих зданий недостаточен, малое количество шурфов не позволяет определить объемное распределение активности радионуклидов в материалах конструкций, систем, элементов ОИАЭ. Указанных недостатков можно избежать, разрабатывая программу обследования с учетом данных информационной модели, в том числе по итогам их камеральной обработки с целью выявления необходимости проведения дополнительных измерений;
- разработка технических заданий на проведение КИРО, составление программ КИРО должны выполняться с учетом требований РБ-159-19 [2] и РБ-160-19 [15].

Соответствующие оценки должны лежать в основе проектных решений по обращению с РАО и промышленными отходами, при определении

трудоемкости работ по дезактивации и обращению с РАО.

В дальнейшем ЦИМ должны становиться частью базы данных по ВЭ, в которой будет накапливаться информация, полученная на всех этапах работ. Это также позволит снизить неопределенности оценок объемов образования РАО на основе включения в анализ фактических данных, полученных на первых этапах работ по ВЭ. В дальнейшем, по мере накопления информации по различным объектам, оценки по иным объектам будут уточняться за счет формирования более обоснованных статистических гипотез о характере их радиационного загрязнения и факторах, его определяющих.

Литература

1. НП-057-04. Правила обеспечения безопасности при выводе из эксплуатации ядерных установок ядерного топливного цикла. Ростехнадзор, 2004.
2. РБ-159-19. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Рекомендации по проведению комплексного инженерного и радиационного обследования объекта использования атомной энергии»
3. Кузнецов А. Ю., Белоусов С. В., Хлебников С. В., Бочаров К. Г. Обращение с радиоактивными отходами при выводе из эксплуатации исследовательского корпуса «Б» АО «ВНИИНМ» // Радиоактивные отходы. 2020. № 1 (10). С. 73–84. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-73-84.
4. BIM: Leaving a Legacy, by Ben Cronin. URL: <https://www.newcivilengineer.com/archive/bim-leaving-a-legacy-23-03-2015/?blocktitle=top-features&contentid=1079>.
5. Былкин Б. К., Бунто П. А., Тихоновский В. Л., Чуйко Д. В. Применение имитационно-обучающего тренажера для демонтажа блоков АЭС // Атомная энергия. 2012. Том 113. № 6. С. 333–336.
6. Материалы интернет-ресурса «Атомная энергия», Информационная поддержка проектирования вывода из эксплуатации 1 и 2 блоков Белоярской АЭС. URL: <https://www.atomic-energy.ru/articles/2013/07/12/42771>.
7. Лужецкий А. В., Невров Ю. В., Ведерникова М. В., Иванов А. Ю., Линге Ин. И., Неуважаев Г. Д., Савельева Е. А., Шпиньков В. И., Понизов А. В. О создании интегральной информационной модели для определения стратегии развития промышленного комплекса по обращению с радиоактивными отходами ФГУП «РАДОН» // Радиоактивные отходы. 2020. № 1 (10). С. 101–112. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-101-112.

8. *Ikjune Kim, Dongjun Hyun, Sungmoon Joo, Jonghwan Lee*. A methodology for digital mockup update based on the 3D scanned spatial information for the automated dismantling of nuclear facilities // Korea Atomic Energy Research Institute, 989-111 Daedeok-daero, Yuseong-gu, Daejeon 34057, Republic of Korea, *Annals of Nuclear Energy* 139 (2020), 2020.
9. *Ikjune Kim, Byungseon Choi, Dongjun Hyun, Jeikwon Moon, Jonghwan Lee, Kwanseong Jeong, Shinyoung Kang*. A framework for a flexible cutting-process simulation of a nuclear facility decommission // *Annals of Nuclear Energy*. 2016. № 97, pp. 204–207.
10. Материалы интернет-ресурса <https://bimforum.org>, Level of Development Specification. URL: <https://bimforum.org/LOD/>.
11. *Eann A. Patterson, Richard J. Taylor, Mark Bankhead*. A framework for an integrated nuclear digital environment // *Progress in Nuclear Energy*. 2016. № 87. pp. 97–103. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pnucene.2015.11.009>.
12. *Borrmann F*. Knowledge management toward, during, and after decommissioning. In book: *Advances and Innovations in Nuclear Decommissioning*. Woodhead Publishing Series in Energy, 2017, pages 73–90. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101122-5.00004-1>.
13. *Демьянов В. В., Савельева Е. А.* Геостатистика. Теория и практика. М. : Наука, 2010. — 327 с.
14. *Preparata F. P., Shamos M. I.* *Computational Geometry: An Introduction*. Springer-Verlag. New York. 1985.
15. РБ-160-19. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Рекомендации по разработке программы комплексного инженерного и радиационного обследования объекта использования атомной энергии».

Информация об авторах

Александрова Татьяна Александровна, инженер, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., 52), e-mail: aleksandrova_ta@ibrae.ac.ru.

Иванов Артем Юрьевич, и. о. заведующего отделения, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., 52), e-mail: aivanov@ibrae.ac.ru.

Линге Иннокентий Игоревич, главный специалист, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., 52), e-mail: iil@ibrae.ac.ru.

Лунов Дмитрий Михайлович, ведущий инженер, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., 52), e-mail: dm.lunov@ibrae.ac.ru.

Савельева Елена Александровна, кандидат физико-математических наук, заведующая лабораторией, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., 52), e-mail: esav@ibrae.ac.ru.

Самойлов Андрей Анатольевич, старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., 52), e-mail: samoylov@ibrae.ac.ru.

Уткин Виктор Борисович, руководитель проекта, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., 52), e-mail: utkin.vb@ibrae.ac.ru.

Библиографическое описание статьи

Александрова Т. А., Иванов А. Ю., Линге Ин. И., Лунов Д. М., Савельева Е. А., Самойлов А. А., Уткин В. Б. Оценка объемов образования РАО от вывода из эксплуатации с использованием информационных моделей // *Радиоактивные отходы*. 2020. № 3 (12). С. 19–31. DOI: [10.25283/2587-9707-2020-3-19-31](https://doi.org/10.25283/2587-9707-2020-3-19-31).

RW VOLUMES FROM THE DECOMMISSIONING ESTIMATED USING INFORMATION MODELS

Aleksandrova T. A., Ivanov A. Yu., Linge In. I., Lunov D. M., Saveleva E. A.,
Samoylov A. A., Utkin V. B.

Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Article received on August 12, 2020

At present time, intensive efforts on the decommissioning of nuclear facilities are actively performed with the efficiency improvement viewed as a key task as regards their planning. Since the management of the generated radioactive waste is considered as a main component of the decommissioning cost, reliable estimate of the generated RW amounts is essential. The paper seeks to demonstrate an approach to assessing the amounts of decommissioning RW based on the data from comprehensive engineering and radiation survey of a facility in question using digital information models.

Keywords: radioactive waste (RW), decommissioning, building information model (BIM), federal target program, effectiveness.

References

1. NP-057-04. *Pravila obespecheniya bezopasnosti pri vyvode iz ekspluatatsii yadernykh ustanovok yadernogo toplivnogo tsikla* [Safety Rules During the Decommissioning of Nuclear Fuel Cycle Facilities]. Rostekhnadzor, 2004.
2. RB-159-19. *Rukovodstvo po bezopasnosti pri ispolzovanii atomnoj jenerгии "Rekomendatsii po provedeniyu kompleksnogo inzhenernogo i radiatsionnogo obsledovaniya obyekta ispolzovaniya atomnoj energii"* [Safety Guidelines in the Field of Atomic Energy Use. Recommendations for Comprehensive Engineering and Radiation Survey of a Nuclear Facility].
3. Kuznetsov A. Yu., Belousov S. V., Khlebnikov S. V., Bocharov K. G. Obrashchenie s radioaktivnymi otkhodami pri vyvode iz ekspluatatsii issledovatel'skogo korpusa "B" AO "VNIINM" [Radioactive Waste Management During the Decommissioning of Research Building "B" at JSC VNIINM site]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive waste*, 2020, no. 1 (10), pp. 73–84. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-73-84.
4. *BIM: Leaving a Legacy*, by Ben Cronin. URL: <https://www.newcivilengineer.com/archive/bim-leaving-a-legacy-23-03-2015/?blocktitle=top-features&contentid=1079>.
5. Bylkin B. K., Bunto P. A., Tikhonovskij V. L., Chujko D. V. Primenenie imitatsionno-obuchayushchego trenazhera dlya demontazha blokov AES [Application of a Simulation and Training Simulator for NPP Unit Dismantlement]. *Atomnaya energiya — Atomic Energy*, 2012, vol. 113, iss. 6, pp. 333–336.
6. Web-link "Atomnaya Energiya", Informatsionnaya podderzhka proektirovaniya vyvoda iz ekspluatatsii 1 i 2 blokov Beloyarskoj AES [Materials from Atomic Energy Web Resource: Information Support for the Development of Decommissioning Designs for Beloyarsk NPP Units 1 and 2]. URL: <https://www.atomic-energy.ru/articles/2013/07/12/42771>. (In Russian).
7. Luzhetskiy A. V., Nevrov Yu. V., Vedernikova M. V., Ivanov A. Yu., Linge In. I., Neuvazhaev G. D., Saveleva E.A., Shpinkov V. I., Ponizov A. V. O sozdani integralnoy informatsionnoy modeli dlya opredeleniya strategii razvitiya promyshlennogo kompleksa po obrashcheniyu s radioaktivnymi otkhodami FGUP «RADON» [Development of an Integral Digital Model of FSUE "Radon" Radioactive Waste Management Facility for Strategic Decision-Making]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive waste*, 2020, no. 1 (10), pp. 101–112. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-101-112.
8. IkJune Kim, Dongjun Hyun, Sungmoon Joo, Jonghwan Lee. A methodology for digital mockup update based on the 3D scanned spatial information for the automated dismantling of nuclear facilities. *Annals of Nuclear Energy* 139 (2020), 2020.
9. IkJune Kim, Byungseon Choi, Dongjun Hyun, Jeikwon Moon, Jonghwan Lee, Kwansong Jeong, Shinyoung Kang. A framework for a flexible cutting-process simulation of a nuclear facility decommission. *Annals of Nuclear Energy*, 2016, no. 97, pp. 204–207.
10. Web-link <<https://bimforum.org>>, Level of Development Specification. URL: <https://bimforum.org/LOD/>, in English, link checked on: 30.07.2020.
11. Eann A. Patterson, Richard J. Taylor, Mark Bankhead. A framework for an integrated nuclear digital environment. *Progress in Nuclear Energy*. 2016. № 87.

- pp. 97–103. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pnu-cene.2015.11.009>.
12. Borrmann F. Knowledge management toward, during, and after decommissioning. In book: *Advances and Innovations in Nuclear Decommissioning*. Woodhead Publishing Series in Energy, 2017, pages 73–90. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101122-5.00004-1>.
13. Demyanov V. V., Savelyeva E. A. *Geostatistika. Teoriya i praktika* [Geostatistics. Theory and practice]. Moscow, Nauka Publ., 2010. P. 327.
14. Preparata F. P., Shamos M. I. *Computational Geometry: An Introduction*. Springer-Verlag. New York. 1985.
15. RB-160-19. *Rukovodstvo po bezopasnosti pri ispolzovanii atomnoy energii "Rekomendatsii po razrabotke programmy kompleksnogo inzhenernogo i radiatsionnogo obsledovaniya obyekta ispolzovaniya atomnoy energii"* [Safety Guidelines in the Field of Atomic Energy Use. Recommendations on the Development of a Program for Comprehensive Engineering and Radiation Survey of a Nuclear Facility].

Information about the authors

Aleksandrova Tatiana Aleksandrovna, Engineer, Nuclear Safety Institute of Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulkaya St., Moscow, 115191, Russia), e-mail: aleksandrova_ta@ibrae.ac.ru.

Ivanov Artem Yurievich, Head of Department, Nuclear Safety Institute of Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulkaya St., Moscow, 115191, Russia), e-mail: aivanov@ibrae.ac.ru.

Linge Innokentiy Igorevich, Senior specialist, Nuclear Safety Institute of Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulkaya St., Moscow, 115191, Russia), e-mail: iil@ibrae.ac.ru.

Lunov Dmitriy Mihajlovich, Lead Engineer, Nuclear Safety Institute of Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulkaya St., Moscow, 115191, Russia), e-mail: dm.lunov@ibrae.ac.ru.

Saveleva Elena Aleksandrovna, PhD, Head of Laboratory, Nuclear Safety Institute of Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulkaya St., Moscow, 115191, Russia), e-mail: esav@ibrae.ac.ru.

Samoylov Andrey Anatolevich, Senior Researcher, Nuclear Safety Institute of Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulkaya St., Moscow, 115191, Russia), e-mail: samoylov@ibrae.ac.ru.

Utkin Viktor Borisovich, Project Manager, Nuclear Safety Institute of Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulkaya St., Moscow, 115191, Russia), e-mail: utkin.vb@ibrae.ac.ru.

Bibliographic description

Aleksandrova T. A., Ivanov A. Yu., Linge In. I., Lunov D. M., Saveleva E. A., Samoylov A. A., Utkin V. B. RW Volumes from the Decommissioning Estimated Using Information Models. *Radioactive Waste*, 2019, no. 3 (8), pp. 36–43. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-3-19-31. (In Russian).