УТОЧНЕНИЕ ПРОГРАММЫ КИРО ОБЪЕКТОВ ЯДЕРНОГО НАСЛЕДИЯ НА ОСНОВЕ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ

П.А. Кизуб, Е.А. Савельева, П.А. Блохин, А.А. Самойлов

ИБРАЭ РАН, г. Москва

эл. почта: [kizub@ibrae.ac.ru](mailto:kizub@ibrae.ac.ru)

**Введение**

Предварительная оценка радиационной безопасности персонала при реализации мероприятий по выводу из эксплуатации (ВЭ) объектов ядерного наследия (ОЯН) является важной задачей, для решения которой должны использоваться научно-обоснованные методические подходы. Кроме того, качество результатов проведения подобных оценок существенно зависит от полноты и достоверности исходных данных, источником которых, как правило, кроме прочих выступают результаты комплексного инженерного и радиационного обследования (КИРО) ОЯН. Анализ опыта реализации требований к КИРО [1] на практике показывает, что зачастую полученные данные не позволяют однозначно интерпретировать и локализовать источники ионизирующих излучений: отсутствует информация о составе радиационного загрязнения, его активности, пространственном распределении и др.

Вышеуказанные неопределенности не дают возможности достоверно оценить радиационную обстановку вблизи ОЯН даже в расчетах с помощью современных аттестованных нейтронно-физических кодов. Эти обстоятельства привели к необходимости разработки расчетно-аналитического подхода, использующего решение обратной задачи. Суть подхода заключается в оценке активности источников исследуемого объекта по заданным в определенных регистрационных зонах значениям мощности эквивалентной дозы (МЭД). Полученные значения активностей используются для восстановления пространственных распределений МЭД вблизи ОЯН. Решение обратной задачи может выполняться для различных вариантов наборов регистрационных зон, что позволяет проводить вариантные расчеты и выбирать наиболее «удачные» наборы зон, приводящие к ожидаемым распределениям МЭД. Эти наборы зон могут рекомендоваться для дозиметрических измерений при проведении КИРО ОЯН.

**Описание подхода**

Схематичное изображение предлагаемого подхода представлено на рисунке 1. Подход основывается на совместных расчетах по нейтронно-физическому коду и коду для оценки неопределенности.

На первом тапе выполняются нейтронно-физические расчеты с помощью расчетно-прогностического кода (РПК) КОРИДА [2], предназначенного для решения задач обоснования радиационной безопасности объектов ядерного наследия и пунктов захоронения РАО. Расчеты проводятся с помощью Монте-Карло модуля TDMCC [3], в результате которых определяются:

* пространственные распределения МЭД на единичную активность (*МЭД/ 1 Бк*) от каждого источника ионизирующего излучения ВЭ ОЯН;
* пространственные распределения МЭД, полученные в результате решения прямой задачи с использованием имеющихся данных КИРО для РОО (*МЭДКИРО*) или с использованием заданных значений полных активностей источников излучения.

Далее выбираются различные наборы регистрационных зон вблизи исследуемого ОЯН и им присваиваются полученные для этих зон значения *МЭД/ 1 Бк* и *МЭДКИРО*. Выбор зон не маловажен, поскольку необходимо учесть реальные возможности персонала, выполняющего КИРО, и охватить как можно больше вариантов расположения зон.

На втором этапе наборы значений *МЭД/ 1 Бк* и *МЭДКИРО* служат исходными данными для РПК MOUSE [4], позволяющего с помощью метода эвристической оптимизации [5], решить обратную задачу и оценить активности источников излучения ОЯН для каждого варианта задания регистрационных зон. Таким образом, проводятся вариантные совместные расчеты, путем варьирования расположения и количества зон регистраций.

На третьем этапе активности источников для различных наборов зон регистраций, полученные в результате вышеописанных совместных расчетов, в свою очередь применяются для вычисления распределений МЭД от каждого источника. Их сумма дает распределение полноценной МЭД. Качественное и количественное сравнения распределений, полученных таким способом, с распределением *МЭДКИРО* позволяет выбрать оптимальные зоны, по значениям МЭД в которых возможно достоверно восстановить радиационные поля вблизи ОЯН.

Оптимальные варианты задания зон регистраций (их количество и расположение) могут рекомендоваться в качестве точек измерения МЭД при проведении КИРО на аналогичных объектах.



*Рисунок 1 – Схематичное изображение подхода формирования рекомендаций по проведению КИРО.*

**Формирование рекомендаций по проведению КИРО на примере аппарата химической технологии**

Подход формирования рекомендаций по проведению КИРО отрабатывался на практической задаче по ВЭ аппарата химической технологии в закрытом каньоне площадки № 3 АО «СХК» [6].

На первом этапе была разработана модель аппарата и проведены нейтронно-физические расчеты с ее использованием.

*Расчетная модель аппарата*

Аппарат представляет собой сварной вертикальный стальной сосуд цилиндрической формы с приваренными верхней эллипсоидной крышкой и нижним эллипсоидным днищем. Габаритные размеры: диаметр 242,8 см, высота 379,6 см. Аппарат установлен на дне цилиндрического бетонного каньона (на высоте 30 см, трубные обвязки и опоры в модель не входят) с внутренним диаметром 350 см и высотой 480 см. Дно и стены каньона облицованы стальными листами толщиной 0,3 см. Верхнее бетонное перекрытие каньона имеет толщину 95 см.

Модель аппарата, окруженного со всех сторон цилиндрическими бетонными стенами, представлена в виде цилиндра в центральной части и двух эллипсоидов, имитирующих днище снизу и крышку сверху. Схематичное изображение аппарата в закрытом каньоне представлено на рисунке 2.



*Рисунок 2 – Продольное сечение расчетной модели аппарата в бетонном каньоне; модели поверхностных цилиндрических и круговых источников излучения*

Пространственные распределения источников гамма-излучения задавались, исходя из общих предположений, где могли образоваться радиоактивные «загрязнения» в процессе работы аппарата. Так, в качестве «загрязнения» поверхности аппарата выступали 6 источников: источники И 1-3 – круговые или цилиндрические поверхности, имитирующие крышку, корпус и дно аппарата соответственно (синяя, красная и зеленая линии на рисунке 2); источники И 6-8 – цилиндрические поверхности внутри аппарата, имитирующие его внутренние поверхности крышки, корпуса и дна соответственно (пунктирные синие, красные и зеленые линии на рисунке 2). В качестве «загрязнения» дна и стен каньона выступали источник И 4 – круговая поверхность над полом (фиолетовая линия на рисунке 2) и источник И 5 – цилиндрическая поверхность вблизи перекрытий (оранжевые линии на рисунке 2). Все 8 источников излучения изотропные равномерно распределенные по соответствующим поверхностям. В качестве основного гамма-излучающего радионуклида выбрали цезий-137.

Для расчетных моделей с вышеописанными источниками гамма-излучений по РПК КОРИДА вычислены пространственные распределения *МЭД/1 Бк* с использованием коэффициентов перевода плотности потока излучения в мощность эквивалентной дозы для кожи человека в соответствии с НРБ-99/2000 [7].

*Выбор зон регистраций*

Следующим шагом был выбор различных вариантов задания зон со значениями *МЭДКИРО*.

Для исследования рассмотрели 9 вариантов задания зон. Для варианта № 1 значения МЭД задавались в 11 зонах, находящихся вблизи поверхности аппарата и вблизи стен каньона (точки 1-11 на рисунке 3 *а*). Для варианта № 2 – в 10 зонах, находящихся между аппаратом и стенами каньона (точки 12-21 на рисунке 4 *а*). Вариант № 3 – это все точки вариантов № 1 и 2 (точки 1-21). Варианты № 4-6 – это различные комбинации 8 точек из варианта № 2. В варианте № 4 отсутствуют 2 точки напротив центральной части аппарата (точки 12-15 и 18-21), в варианте № 5 – одна точка напротив центральной части аппарата и одна точка внизу каньона (точки 13-16 и 18-21), а в варианте № 6 – одна точка напротив центральной части аппарата и одна точка вверху каньона (точки 12-16 и 18-20). Варианты № 7-9 – это различные комбинации 7-9 точек из варианта № 3.

Значения *МЭДКИРО*, которые задавались в вышеописанных зонах, получены в результате решения прямой задачи с использованием имеющихся данных КИРО. На рисунках 3 и 4 *б)* представлены полученные распределения *МЭДКИРО* у поверхности аппарата.

*Результаты совместных расчетов и аналитика*

Следующим этапом был расчет активностей всех источников аппарата по РПК MOUSE для каждого варианта задания зон регистраций. Полученные значения активностей использовались для нахождения пространственных распределений МЭД в различных областях каньона. Для примера на рисунках 3 и 4 *б)* в сравнении с распределением *МЭДКИРО* представлены высотные распределения МЭД у поверхности аппарата для вариантов задания точек № 1 и 2 соответственно.

Сравнительный анализ распределений на рисунке 3 *б)* показал, что вариант № 1 задания регистрационных зон, когда они располагались вблизи источников излучения, не привел к ожидаемому распределению *МЭДКИРО*: распределения не совпали как качественно, так и количественно (особенно внизу и в центральной части аппарата).

Сравнительный анализ распределений на рисунке 4 *б)* показал, что вариант № 2 задания регистрационных зон, когда они располагались несколько удаленно от источников излучения, привел к близкому распределению *МЭДКИРО* как качественно, так и количественно. Аналогичная ситуация наблюдалась также и для других удаленных от источников вариантов задания точек – вариантов 4 и 6. При этом, когда из «удаленных» точек убрали точку, находящуюся внизу каньона, где ожидаются максимальные значения МЭД (вариант № 5), полученное распределение сильно не совпало в нижней части аппарата.

|  |  |
| --- | --- |
| *а)* | *б)* |

*Рисунок 3– Схематичное расположение зон регистраций для варианта № 1 (а) и распределение МЭД у поверхности аппарата в сравнении с распределением МЭДКИРО (б).*

|  |  |
| --- | --- |
| *а)* | *б)* |

*Рисунок 4 – Схематичное расположение зон регистраций для варианта № 2 (а) и распределение МЭД у поверхности аппарата в сравнении с распределением МЭДКИРО (б).*

Аналогично проведенный сравнительный анализ распределений для вариантов № 3, 7-9 показал, что варианты задания регистрационных зон, когда они располагались и вблизи источников излучения и удаленно от них, не привели к ожидаемому распределению *МЭДКИРО*: распределения не совпали как качественно, так и количественно (особенно внизу и в центральной части аппарата).

Таким образом, на основании проведенного сравнительного анализа можно сделать следующие выводы по части зон регистраций:

* наличие зон вблизи источников излучения приводит к некорректным распределениям МЭД (варианты № 1, 3, 7-9);
* в случае использования зон вблизи источников, ситуацию не «спасет» даже их большое количество (вариант № 3), то есть для достижения корректных распределений МЭД все зоны должны быть удалены от источников (варианты № 2, 4 и 6);
* не использование зон, где ожидаются максимальные значения МЭД, приводит к некорректным распределениям в этой особенно важной области (вариант № 5);
* для получения корректных распределений МЭД достаточно 8 зон (варианты № 4 и 6).

**Заключение**

В работе представлен подход формирования рекомендаций по проведению КИРО для улучшения его качества. Рекомендации касаются регистрационных зон, по значениям МЭД в которых будет корректно решаться обратная задача – расчет активностей источников излучения по имеющимся значениям МЭД – что в свою очередь дает возможность достоверно оценить дозовые поля вблизи ОЯН.

Подход формирования рекомендаций по проведению КИРО отрабатывался на каньоне с аппаратом химической технологии переработки облученных стандартных урановых блоков. Показано, что на корректное восстановление дозовых полей внутри каньона влияет расположение регистрационных зон. По полученным на данном примере результатам, можно сформулировать предварительные рекомендации по выбору регистрационных зон при проведении КИРО рассматриваемого аппарата:

* минимальное количество зон должно соответствовать числу источников ионизирующего излучения;
* все зоны должны располагаться несколько удаленно от источников излучения;
* необходимо использовать зоны, в которых ожидаются максимальные значения МЭД.

Следует отметить, что представленный подход находится на начальной стадии разработки и требует дальнейшей отработки на других практических задачах. Приведенные рекомендации касаются только рассмотренных условий ОЯН. Например, на данный момент времени рассматривались источники излучений только с одним радионуклидом (цезием-137), можно ожидать, что добавление других радионуклидов (например, кобальта-60) усложнит решение задачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Рекомендации по разработке программы комплексного инженерного и радиационного обследования объекта использования атомной энергии (РБ – 160 – 19). – Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, Москва, 2019.
2. Блохин А.И., Блохин П.А., Ванеев Ю.Е., Сипачев И.В. [Программный комплекс "КОРИДА" для прогнозирования радиационных полей с учетом изменений характеристик источников излучения и инженерных барьеров безопасности](https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41668818) // [Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов](https://www.elibrary.ru/contents.asp?id=41668812). – 2019. – [№ 4](https://www.elibrary.ru/contents.asp?id=41668812&selid=41668818). – С. 78-87.
3. Программа TDMCC (Time Dependent Monte Carlo Code). Житник А.К., Рослов В.И., Семенова Т.В. и др. Свидетельство о государственной регистрации №2010614412 ФГУП «РФЯЦ ВНИИЭФ».
4. Савельева Е. А. Концепция программного комплекса для оценки неопределенности при обосновании безопасности пунктов захоронения РАО //Ядерная и радиационная безопасность. – 2016. – №. 4. – С. 22-35.
5. Chakraborty U. K. (ed.). Advances in differential evolution. – Springer, 2008. – Т. 143
6. Вывод из эксплуатации площадки №3 радиохимического завода АО «СХК». Вывод из эксплуатации производства переработки ОСУБ. Основные технологические и организационно-технические решения, № 311/01-01/546-ВК от 03.03.2020.
7. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009: Гигиенические нормативы СП 2.6.1.2523-09. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора России, 2009. - 100 с.