ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ЭКОЛОГИЧЕСКОМУ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ И АТОМНОМУ НАДЗОРУ
(РОСТЕХНАДЗОР)

ПРИКАЗ

29 декабря 2008 г. № 666

Москва

Об утверждении руководства по безопасности при использовании атомной энергии «Рекомендации по обоснованию выбора варианта вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии»

В целях реализации полномочий, установленных подпунктом 5.3.18 пункта 5 Положения о Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 30 июля 2004 г. № 401, приказываю:

Утвердить прилагаемое к настоящему приказу руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Рекомендации по обоснованию выбора варианта вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии».

Руководитель А.В. Алёшин

gost.e-ecolog.ru

УТВЕРЖДЕНО
приказом Федеральной службы
по экологическому, технологическому
и атомному надзору
от «29» декабря 2018 г. № 666

Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Рекомендации по обоснованию выбора варианта вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии» (РБ-153-18)

I. Общие положения

1. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Рекомендации по обоснованию выбора варианта вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии» (РБ-153-18) (далее – Руководство по безопасности) разработано в соответствии со статьей 6 Федерального закона от 21 ноября 1995 г. № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии» в целях содействия соблюдению требований пункта 13 федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Обеспечение безопасности при выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии. Общие положения» (НП-091-14), утвержденных приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 20 мая 2014 г. № 216; пунктов 6 и 7 федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Правила обеспечения безопасности при выводе из эксплуатации ядерных установок ядерного топливного цикла» (НП-057-17), утвержденных приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 14 июня 2017 г. № 205; пункта 17 федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Правила обеспечения безопасности при выводе из эксплуатации промышленных уран-графитовых реакторов» (НП-007-17), утвержденных приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору

от 8 сентября 2017 г. № 357; пункта 8 федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Правила обеспечения безопасности при выводе из эксплуатации блока атомной станции» (НП-012-16), утвержденных приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 10 января 2017 г. № 5; пункта 24 федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Правила обеспечения безопасности при выводе из эксплуатации исследовательских ядерных установок» (НП-028-16), утвержденных приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 4 апреля 2017 г. № 108; пункта 34 федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности» (НП-055-14), утвержденных приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 22 августа 2014 г. № 379.

2. Настоящее Руководство по безопасности содержит рекомендации Ростехнадзора по выбору варианта вывода из эксплуатации объекта использования атомной энергии и оценке достаточности объема проведенных изысканий и научных исследований для обоснования варианта вывода из эксплуатации объекта использования атомной энергии.

3. Настоящее Руководство по безопасности распространяется на ядерные установки, пункты хранения ядерных материалов, радиоактивных веществ и радиоактивных отходов (далее – РАО), радиационные источники (далее – объекты использования атомной энергии, ОИАЭ).

Настоящее Руководство по безопасности не распространяется на радиационные источники, содержащие в своем составе только радионуклидные источники четвертой и пятой категорий радиационной опасности, мобильные радиационные источники и радиационные источники на основе серийных радиоизотопных приборов, радиационные источники, в которых генерируется ионизирующее излучение, а также пункты размещения, пункты консервации особых РАО и пункты захоронения РАО.

4. Настоящее Руководство по безопасности рекомендуется для применения в отношении ОИАЭ, находящихся на стадии эксплуатации (в том числе окончательно остановленных для вывода из эксплуатации), при выборе и обосновании выбора варианта вывода из эксплуатации (далее – ВЭ) для разработки и уточнения программы и проекта ВЭ по результатам комплексного инженерного и радиационного обследования (далее – КИРО).

5. Требования федеральных норм и правил в области использования атомной энергии могут быть выполнены с использованием иных способов, чем те, которые содержатся в настоящем Руководстве по безопасности, при обосновании выбранных способов для обеспечения безопасности.

II. Выбор и обоснование варианта вывода из эксплуатации объекта использования атомной энергии

6. Рекомендуется в концепции ВЭ рассматривать вариант «Ликвидация», реализуемый способами «Отложенная ликвидация» и «Немедленная ликвидация», вариант, предусматривающий создание пункта захоронения, а также их комбинации.

7. При сопоставлении рассмотренных в концепции ВЭ ОИАЭ возможных вариантов ВЭ для выбора конкретного варианта рекомендуется использовать методы многофакторного выбора на конечном множестве альтернатив (вариантов ВЭ ОИАЭ), с учетом следующего минимального набора факторов:

количественный показатель медико-социального обоснования соотношения «польза-вред» в соответствии с принципом обоснования;

технико-экономический показатель, связанный с реализацией каждого из рассматриваемых вариантов ВЭ.

8. Принятие решения о выборе варианта ВЭ ОИАЭ рекомендуется осуществлять в следующей последовательности:

идентификация вариантов ВЭ ОИАЭ, подлежащих оцениванию;

нормализация факторов;

оценка предпочтений;

оценка вариантов ВЭ ОИАЭ и предварительный выбор варианта ВЭ;

анализ чувствительности;

окончательный выбор варианта ВЭ ОИАЭ.

Идентификация вариантов вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии, подлежащих оцениванию

9. Для каждого варианта ВЭ ОИАЭ рекомендуется определять количественные значения каждого фактора. Для минимального набора факторов рекомендуется действовать в соответствии с пунктами 10 – 13 настоящего Руководства по безопасности.

10. Фактор по медико-социальному обоснованию соотношения «польза-вред» рекомендуется определять на основе количественных показателей пользы и вреда для здоровья в результате облучения при осуществлении деятельности. При этом для количественной оценки используется формула:

$$K_{1j} = U_{0j} - U_{1j}, j = 1 \dots m, \quad (1)$$

где:

m – число рассматриваемых вариантов ВЭ ОИАЭ;

K_{1j} – количественное значение первого фактора для j-го варианта ВЭ ОИАЭ;

U_{1j} – вред, наносимый здоровью людей (персонала ОИАЭ, населения) и окружающей среде от облучения, не устраненного защитными мерами при реализации j-го варианта ВЭ ОИАЭ;

U_{0j} – вред для здоровья в результате отказа от реализации j-го варианта ВЭ ОИАЭ. В простейшем случае может рассматриваться как вред для здоровья в результате отказа от ВЭ вообще.

При этом под вредом от облучения за одинаковые отрезки времени понимается сокращение числа человеко-лет жизни. В соответствии с санитарными правилами и нормативами СП 2.6.1.2612-10 «Основные

санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010)», утвержденными постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 26 апреля 2010 г. № 40 (зарегистрировано Министерством юстиции Российской Федерации 11 августа 2010 г., регистрационный № 18115) (далее – ОСПОРБ-99/2010), облучение в коллективной эффективной дозе в 1 человеко-зиверт (далее – чел.-Зв) приводит к потере 1 человеко-года жизни. В настоящем Руководстве по безопасности мерой вреда для здоровья можно рассматривать коллективную эффективную дозу.

11. Расчет коллективной эффективной дозы рекомендуется проводить на основании сценариев, характерных для реализации каждого из рассматриваемых вариантов ВЭ.

12. В качестве минимального набора работ, комбинации которых используются в рассматриваемых вариантах ВЭ, рекомендуется руководствоваться примерным перечнем, приведенным в приложении № 1 к настоящему Руководству по безопасности.

13. Технико-экономический показатель, связанный с реализацией каждого из рассматриваемых вариантов ВЭ, рекомендуется определять на основании сформированных наборов работ по формуле:

$$K_{2j} = \sum_{k=1}^{s} Vkj, j = 1 \dots m, \quad (2)$$

где:

m – число рассматриваемых вариантов ВЭ ОИАЭ;

K_{2j} – количественное значение фактора 2 для j-го варианта ВЭ ОИАЭ;

s – число выполняемых работ для j-го варианта ВЭ ОИАЭ;

Vkj – расходы на выполнение k-ой работы для j-го варианта ВЭ ОИАЭ.

14. Набор факторов может быть расширен с учетом конкретных характеристик ОИАЭ и места его расположения. При этом фактор не может быть выбран, если его количественное значение одинаково для всех вариантов ВЭ ОИАЭ.

15. Примерный перечень дополнительных факторов, рекомендуемых для оценки при рассмотрении различных вариантов вывода из эксплуатации и их комбинаций, представлен в приложении № 2 к настоящему Руководству по безопасности.

16. Для количественного определения фактора, подразумевающего его наличие (отсутствие), рекомендуется использовать значение «0» в случае его отсутствия и значение «1» – в случае его наличия.

Нормализация факторов

17. При нормализации факторов осуществляется приведение факторов к безразмерной форме K_{ij}^{H}:

$$K_{ij}^{H} = \frac{K_i^{max} - K_{ij}}{K_i^{max} - K_i^{min}}, i = 1 \dots n,\ j = 1 \dots m, \quad (3)$$

где:

m – число рассматриваемых вариантов ВЭ ОИАЭ;

n – число факторов, отобранных для сопоставления вариантов ВЭ ОИАЭ;

K_i^{max} – максимальное значение i-го фактора всех m вариантов ВЭ ОИАЭ;

K_i^{min} – минимальное значение i-го фактора всех m вариантов ВЭ ОИАЭ;

K_{ij} – ненормализованное (нормализируемое) значение i-того фактора для j-ого варианта ВЭ ОИАЭ.

При нормализации факторов рекомендуется учитывать качественное влияние значения фактора на выбор варианта ВЭ ОИАЭ следующим образом:

оставлять знак количественного значения нормализованного фактора положительным в случае, если предпочтительна минимизация фактора;

менять знак количественного значения нормализованного фактора на противоположный, если предпочтительна максимизация фактора.

Оценка предпочтений

18. На этапе оценки предпочтений проводится ранжирование факторов, количественные оценки их важности с учетом ранжирования, определяется многофакторная ценность каждого варианта ВЭ ОИАЭ.

19. Для каждого фактора рекомендуется определить их весовые коэффициенты, учитывающие важность этих факторов, используя классический метод парного сравнения факторов в порядке, изложенном ниже.

20. Составляется квадратная матрица $\|K'_{sk}\|$ парного сравнения факторов размерностью n, диагональным элементам K'_{sk} (s=k) присваиваются значения «1», а остальным элементам матрицы K'_{sk} ($s \neq k$), независимо от варианта вывода из эксплуатации (то есть для любых j=1…m), значения присваиваются следующим образом:

$$K'_{sk}=\begin{cases}1, \text{ если фактор } K_{sj} \text{ более важен, чем фактор } K_{kj}\\ 0, \text{ если фактор } K_{sj} \text{ менее важен, чем фактор } K_{kj}\\ 0{,}5, \text{ если факторы } K_{sj} \text{ и } K_{sj} \text{ имеют одинаковую важность}\end{cases}$$

при s, k=$1,\ldots,n$, (4)

где:

m – число рассматриваемых вариантов ВЭ ОИАЭ;

n – число факторов, отобранных для сопоставления вариантов ВЭ ОИАЭ (размерность матрицы).

Важность факторов определяется экспертно, при расхождении мнений экспертов важность факторов определяется лицом, принимающим решение (одним человеком или группой людей, на которых лежит ответственность за принятое решение).

21. После заполнения матрицы подсчитывается уровень важности каждого фактора K_i по следующей формуле:

$$K_i = \sum_{s=1}^{n} K'_{is},\ i=1,..,n, \quad (5)$$

где:

n – число факторов, отобранных для сопоставления вариантов ВЭ ОИАЭ (размерность матрицы).

22. Затем определяется суммарный уровень важности всех факторов K_c по формуле:

$$K_c = \sum_{i=1}^{n} K_i, i = 1 \dots n, \quad (6)$$

где:

n – число факторов, отобранных для сопоставления вариантов ВЭ ОИАЭ (размерность матрицы).

23. После этого определяются весовые коэффициенты факторов $\propto_i$ по формуле:

$$\propto_i = \frac{K_i}{K_c}, i = 1 \dots n, \quad (7)$$

где:

n – число факторов, отобранных для сопоставления вариантов ВЭ ОИАЭ.

24. При выборе весовых коэффициентов в соответствии с принципом обоснования (Приложение 1 к ОСПОРБ-99/2010) приоритет рекомендуется отдавать показателям здоровья по сравнению с экономическими выгодами.

Оценка вариантов вывода из эксплуатации объекта использования атомной энергии

25. На этапе оценки вариантов ВЭ осуществляется принятие предварительного решения по многофакторной задаче.

26. Наилучший вариант ВЭ ОИАЭ выбирается из совокупности функций свертки по каждому фактору:

$$f_{\text{опт.}} = \max_j \left\{ \sum_{i=1}^{n} \propto_i \cdot K_{ij}^{\text{н}} \right\}, \text{ где } j=1,\dots,m, \quad (8)$$

где:

K_{ij}^{H} – нормализованное значение i-го фактора для j-го варианта ВЭ ОИАЭ;

m – число рассматриваемых вариантов ВЭ ОИАЭ;

n – число факторов, отобранных для сопоставления вариантов ВЭ ОИАЭ.

27. Пример выбора варианта вывода из эксплуатации ОИАЭ приведен в приложении № 3 к настоящему Руководству по безопасности.

Анализ чувствительности

28. На этапе анализа чувствительности изучаются параметры, изменения которых могут привести к значительным изменениям количественных характеристик факторов.

III. Оценка достаточности исследований для принятия решения о выборе варианта вывода из эксплуатации

29. С целью определения устойчивости результатов выбора варианта ВЭ, предусматривающего создание на площадке ОИАЭ пункта захоронения РАО, к неопределенностям количественной оценки факторов, связанных с принятыми предположениями, допущениями и экспертными оценками, рекомендуется проверять относительную значимость источников неопределенности, входящих в процедуру выбора варианта ВЭ (анализ чувствительности), следующим образом:

рассмотреть в качестве источников неопределенности значения параметров расчетов факторов, включенных в процедуру выбора варианта ВЭ;

определить погрешности задания всех параметров расчетов факторов, включенных в процедуру выбора варианта ВЭ (погрешности измерения, оценок, принятых предположений и экспертных оценок), и диапазоны изменения параметров;

выбрать из всех параметров, использованных для количественной оценки факторов, те, погрешности которых вносят определяющий вклад в итоговую погрешность фактора;

повторить процедуру выбора варианта ВЭ для граничных точек диапазона изменений каждого параметра.

30. С целью оценки достаточности проведенных исследований для установления параметров расчетов факторов рекомендуется определить критичность каждого параметра следующим образом:

если в результате повторения процедуры выбора варианта ВЭ для граничных точек диапазона изменения параметра решение остается неизменным, данный параметр критическим не является и дальнейшие исследования с целью его уточнения не требуются;

если в результате повторения процедуры выбора варианта ВЭ для граничных точек диапазона изменения параметра решение меняется, рекомендуется провести дополнительные исследования по его уточнению.

31. Пример анализа чувствительности и определения достаточности проведенных исследований приведен в приложении № 4 к настоящему Руководству по безопасности.

ПРИЛОЖЕНИЕ № 1
к руководству по безопасности
при использовании атомной энергии
«Рекомендации по обоснованию
выбора варианта вывода
из эксплуатации объектов
использования атомной энергии»,
утвержденному приказом
Федеральной службы по
экологическому, технологическому
и атомному надзору
от «29» декабря 2018 г. № 666

Примерный перечень работ, проводимых при различных вариантах вывода из эксплуатации

Перечень основных проводимых работ	**Немедленный демонтаж**	**Отложенный демонтаж**	**Захоронение на месте**
Извлечение радиоактивных веществ и материалов, которые препятствуют проведению работ (например, извлечение накопленных РАО из хранилищ, илов из шахт)	+	+	+
Сохранение под наблюдением		+	
Демонтаж основного технологического оборудования	+	+	+ (частичный демонтаж)
Демонтаж вспомогательного оборудования	+	+	+ (частичный демонтаж)
Демонтаж строительных конструкций	+	+	+ (частичный демонтаж)

Перечень основных проводимых работ	Немедленный демонтаж	Отложенный демонтаж	Захоронение на месте
Дезактивация оборудования	+	+	+
Дезактивация помещений*	+	+	+
Дезактивация строительных конструкций*	+	+	+
Сбор образовавшихся РАО*	+	+	+
Переработка образовавшихся РАО (фрагментация, прессование, кондиционирование, упаковка в контейнеры)	+	+	+
Транспортирование РАО с площадки размещения ОИАЭ	+	+	+ (частично)
Создание дополнительных барьеров безопасности		+ (при необходимости)	+
Осуществление радиационного контроля и мониторинга	+	+	+

* При наличии доступа.

ПРИЛОЖЕНИЕ № 2
к руководству по безопасности
при использовании атомной энергии
«Рекомендации по обоснованию
выбора варианта вывода
из эксплуатации объектов
использования атомной энергии»,
утвержденному приказом Федеральной
службы по экологическому,
технологическому
и атомному надзору
от «29» декабря 2018 г. № 666

Примерный перечень дополнительных факторов, рекомендуемых для оценки при рассмотрении различных вариантов вывода из эксплуатации и их комбинаций

1) Возможность обращения (извлечения, переработки, кондиционирования, транспортирования к существующему пункту захоронения и захоронение) с накопленными и эксплуатационными отходами.

2) Техническая возможность демонтажа основного и вспомогательного оборудования, зданий и сооружений.

3) Возможность повторного использования основного и вспомогательного оборудования, зданий и сооружений.

4) Возможность удаления загрязненной почвы.

5) Необходимость наличия централизованных пунктов окончательной изоляции РАО.

6) Возможность переработки и захоронения образующихся нерадиоактивных отходов.

7) Полнота соответствия требованиям ядерной, радиационной и промышленной безопасности.

8) Наличие соответствующих ресурсов (например, финансовых, людских).

9) Наличие соответствующего нормативного правового обеспечения.

10) Социальные/политические факторы.

11) Возможность повторного использования площадки ОИАЭ (единой недвижимой части ОИАЭ).

ПРИЛОЖЕНИЕ № 3
к руководству по безопасности
при использовании атомной энергии
«Рекомендации по обоснованию
выбора варианта вывода
из эксплуатации объектов
использования атомной энергии»,
утвержденному приказом
Федеральной службы по
экологическому, технологическому
и атомному надзору
от «29» декабря 2018 г. № 666

Пример выбора варианта вывода из эксплуатации объекта использования атомной энергии

Краткая характеристика объекта

Рассмотрим в качестве модельного примера абстрактный ОИАЭ, для которого вариант «захоронение на месте» может быть рассмотрен как один из возможных в соответствии с рекомендациями пункта 6 настоящего Руководства по безопасности, например, остановленный для вывода из эксплуатации промышленный реактор, обладающий следующими параметрами:

1) ядерное топливо удалено;

2) реактор приведен в ядерно-безопасное состояние;

3) определены активности оставшегося оборудования и конструкций, которые подлежат захоронению в случае принятия обоснованного решения о захоронении;

4) определен радионуклидный состав, обуславливающий активность оборудования, мощности дозы в различных помещениях и от оборудования;

5) для установленного радионуклидного состава получена информация о поведении радионуклидов в окружающей среде (определены коэффициенты диффузии, распределения, сорбции в планируемых инженерных барьерах и вмещающих породах);

6) проведены исследования по определению скорости деградации (коррозии) конструкций и оборудования, подлежащих возможному захоронению;

7) определены скорости выхода радионуклидов из источника их содержания;

8) установлены свойства планируемых барьеров безопасности (скорости фильтрации, деградации, плотность, пористость);

9) определены свойства вмещающих пород, необходимые для проведения оценки долговременной безопасности (направление движения и место разгрузки грунтовых вод, с которыми происходит миграция радионуклидов из источника, скорость движения грунтовых вод, свойства породы, складывающей водоносный горизонт, свойства пород, складывающих ненасыщенную зону: плотность, пористость, коэффициент фильтрации);

10) установлены климатические характеристики площадки размещения объекта (годовое количество осадков, количество испарений, глубина промерзания грунтов и прочие характеристики, которые могут повлиять на скорость распространения радионуклидов из источника);

11) проведен комплекс дополнительных исследований:

инженерно-геодезические изыскания;

инженерно-гидрометеорологические изыскания;

инженерно-геологические изыскания;

инженерно-сейсмологические работы;

инженерно-геофизические изыскания;

инженерно-экологические изыскания;

12) осуществляется мониторинг окружающей среды.

Постановка задачи

В рамках данного примера в целях унификации оценок коллективной дозы и затрат введем понятия единицы измерения коллективной дозы (далее – ЕИКД) и единицы измерения затрат (далее – ЕИЗ).

Предположим, что в результате проведенных исследований получен определенный комплекс исходных данных, позволяющих провести разработку проекта ВЭ, оценку долговременной безопасности.

В таблице № 1 приведены возможные варианты ВЭ ОИАЭ.

Таблица № 1

Рассматриваемые варианты ВЭ

Обозначение варианта ВЭ	Наименование варианта ВЭ
f_1	Вариант «Ликвидация ОИАЭ», реализуемый способом «Немедленная ликвидация» (далее – вариант «Немедленная ликвидация»)
f_2	Вариант «Ликвидация ОИАЭ», реализуемый способом «Отложенная ликвидация» (далее – вариант «Отложенная ликвидация»)
f_3	Вариант, предусматривающий создание на площадке ОИАЭ пункта захоронения РАО (далее – вариант «Захоронение»)

В модельном примере рассматриваются варианты ВЭ, указанные в таблице № 1, без их сочетаний.

В качестве факторов, характеризующих выбранные варианты ВЭ, берем минимальный набор факторов в соответствии с пунктом 10 настоящего Руководства по безопасности и добавляем к нему дополнительные факторы из приложения № 2 к настоящему Руководству по безопасности. Соответственно, получаем набор факторов, представленный в таблице № 2.

Таблица № 2

Рассматриваемые факторы для выбора вариантов ВЭ, K_{ij}

Обозначение фактора	Наименование фактора	Качественная характеристика фактора	Примечание
K_{1j}, $j=1,2,3$	Коллективная эффективная доза, полученная в результате реализации j-того варианта ВЭ	Минимизация фактора ведет к большей предпочтительности варианта ВЭ	Минимальный набор факторов
K_{2j}, $j=1,2,3$	Затраты на реализацию j-того варианта ВЭ	Минимизация фактора ведет к большей предпочтительности варианта ВЭ	
K_{3j}, $j=1,2,3$	Необходимость наличия за пределами площадки ОИАЭ централизованных пунктов окончательной изоляции накопленных и образовавшихся в процессе ВЭ РАО для реализации j-того варианта ВЭ	Минимизация фактора ведет к большей предпочтительности варианта ВЭ	Дополнительные факторы
K_{4j}, $j=1,2,3$	Наличие персонала, обладающего подробными знаниями о конкретном ОИАЭ	Минимизация фактора ведет к меньшей предпочтительности варианта ВЭ	

Для принятия окончательного решения необходимо решить задачу многофакторного выбора на данном конечном множестве вариантов ВЭ.

Идентификация вариантов ВЭ, подлежащих оцениванию

На этом этапе для каждого варианта ВЭ определяются количественные значения по каждому из факторов и источники неопределенности.

В соответствии с пунктом 10 настоящего Руководства по безопасности мерой вреда для здоровья (количественным показателем медико-социального обоснования соотношения «польза-вред» в соответствии с принципом обоснования) можно считать коллективную эффективную дозу.

Оценка коллективных эффективных доз

Оценка доз для каждого из вариантов вывода из эксплуатации может проводиться различными способами. Наиболее простой путь – определение мощности эквивалентной дозы в каждом помещении, на каждой территории (для объектов, размещенных в грунте, на территории ОИАЭ), где планируется проведение работ, определение перечня проводимых работ, оценка приблизительного времени и количества персонала для проведения работ и расчет коллективной дозы.

Допустим, оценки доз для разных вариантов вывода из эксплуатации показали следующие результаты:

для варианта «Немедленная ликвидация» – полученная доза при проведении работ составит 1,1 ЕИКД;

для варианта «Отложенная ликвидация» – 1,0 ЕИКД; при рассмотрении данного варианта необходимо учитывать не только дозы, полученные непосредственно при проведении работ по демонтажу, но и облучение персонала, получаемое в период сохранения под наблюдением при проведении работ по обследованию состояния объекта, работ по поддержанию объекта в состоянии, пригодном для дальнейшей ликвидации (например, проведение ремонтных работ);

для варианта «Захоронение» при проведении работ, связанных с созданием пункта захоронения, – 1,0 ЕИКД; однако следует принимать во внимание, что образующийся пункт захоронения будет оказывать радиационное воздействие на население ближайшего населенного пункта;

для определения этого воздействия проводится оценка долговременной безопасности, например, прогнозные расчеты для оценки долговременной безопасности, проведенные для варианта «Захоронение», показали, что население ближайшего населенного пункта получит коллективную дозу за весь период потенциальной опасности РАО, равную 0,5 ЕИКД (учитывается численность ближайшего населенного пункта); таким образом, коллективная эффективная доза для варианта «Захоронение» будет составлять 1,5 ЕИКД.

Значения фактора K_{1j} (коллективная эффективная доза) для рассматриваемых вариантов ВЭ представлены в таблице № 3.

Таблица № 3

Коллективная эффективная доза, полученная в результате реализации *j*-го варианта ВЭ

Варианты ВЭ	**Факторы, K_{1j}**	
f_1	K_{11}	1,1
f_2	K_{12}	1,0
f_3	K_{13}	1,5

Оценка затрат

Оценка стоимости работ для разных вариантов вывода из эксплуатации дала следующие результаты:

для варианта «Немедленная ликвидация» – 4,0 ЕИЗ;

для варианта «Отложенная ликвидация» – 6,0 ЕИЗ; в стоимость работ включаются работы, проводимые по варианту «Немедленная ликвидация», а также стоимость работ по поддержанию объекта в безопасном состоянии в течение периода сохранения под наблюдением;

для варианта «Захоронение» – 2,3 ЕИЗ.

Значения фактора K_{2j} (затраты на реализацию) для рассматриваемых вариантов ВЭ представлены в таблице № 4.

Таблица № 4

Затраты на реализацию j-го варианта ВЭ

Варианты ВЭ	Факторы, K_{2j}	
f_1	K_{21}	4,0
f_2	K_{22}	6,0
f_3	K_{23}	2,3

Оценка необходимости наличия централизованных пунктов окончательной изоляции РАО

Реализация варианта «Немедленная ликвидация» невозможна без наличия за пределами площадки централизованных пунктов окончательной изоляции РАО, способных принять накопленные на ОИАЭ РАО и РАО, которые будут образовываться в процессе ВЭ. Соответственно, для этого варианта ВЭ фактор принимается равным 1.

Реализация варианта «Отложенная ликвидация» также невозможна без наличия за пределами площадки централизованных пунктов окончательной изоляции РАО, способных принять накопленные на ОИАЭ РАО и РАО, которые будут образовываться в процессе ВЭ. Соответственно, для этого варианта ВЭ фактор принимается равным 1.

Для варианта «Захоронение» наличие за пределами площадки централизованных пунктов окончательной изоляции РАО, способных принять накопленные на ОИАЭ РАО и РАО, которые будут образовываться в процессе ВЭ, не является существенным, поскольку пункт захоронения образуется на месте. Соответственно, для этого варианта ВЭ фактор принимается равным 0.

Значения фактора K_{3j} (наличие за пределами площадки ОИАЭ централизованных пунктов окончательной изоляции накопленных и образовавшихся в процессе ВЭ РАО) для рассматриваемых вариантов ВЭ представлены в таблице № 5.

Таблица № 5

Необходимость наличия за пределами площадки ОИАЭ централизованных пунктов окончательной изоляции накопленных и образовавшихся в процессе ВЭ РАО для реализации *j*-го варианта ВЭ

Варианты ВЭ	Факторы, K_{3j}	
f_1	K_{31}	1
f_2	K_{32}	1
f_3	K_{33}	0

Оценка наличия персонала, обладающего подробными знаниями о данном конкретном объекте

Принимается, что для варианта «Немедленная ликвидация» на ОИАЭ будет оставаться персонал, обладающий подробными знаниями о нем. Соответственно, для этого варианта ВЭ – фактор принимается равным 1.

Принимается, что для варианта «Отложенная ликвидация» на ОИАЭ будет утрачен персонал, обладающий подробными знаниями о нем (что, действительно, характерно для ситуаций, когда срок сохранения под наблюдением 50 лет и более). Соответственно, для этого варианта ВЭ – фактор принимается равным 0.

Поскольку реализация варианта «Захоронение» осуществляется без длительных периодов сохранения под наблюдением, принимается, как и для варианта «Немедленная ликвидация», что на ОИАЭ будет оставаться персонал, обладающий подробными знаниями о нем. Соответственно, для этого варианта ВЭ – фактор принимается равным 1.

Значения фактора K_{4j} (наличие персонала) для рассматриваемых вариантов ВЭ представлены в таблице № 6.

Таблица № 6

Наличие персонала, обладающего подробными знаниями о данном конкретном объекте для реализации *j*-го варианта ВЭ

Варианты ВЭ	Факторы, K_{4j}	
f_1	K_{41}	1
f_2	K_{42}	0
f_3	K_{43}	1

Нормализация факторов

Нормализуются факторы для варианта «Немедленная ликвидация»:

$$K_{11}^{\text{Н}} = \frac{K_1^{max} - K_{11}}{K_1^{max} - K_1^{min}} = \frac{1{,}5-1{,}1}{1{,}5-1{,}0} = 0{,}8;$$

$$K_{21}^{\text{Н}} = \frac{K_2^{max} - K_{21}}{K_2^{max} - K_2^{min}} = \frac{6{,}0-4{,}0}{6{,}0-2{,}3} = 0{,}54;$$

$$K_{31}^{\text{Н}} = \frac{K_3^{max} - K_{31}}{K_3^{max} - K_3^{min}} = \frac{1-1}{1-0} = 0;$$

$$K_{41}^{0} = \frac{K_3^{max} - K_{31}}{K_4^{max} - K_4^{min}} = \frac{1-1}{1-0} = 0.$$

Нормализуются факторы для варианта «Отложенная ликвидация»:

$$K_{12}^{\text{Н}} = \frac{K_1^{max} - K_{12}}{K_1^{max} - K_1^{min}} = \frac{1{,}5-1{,}0}{1{,}5-1{,}0} = 1;$$

$$K_{22}^{\text{Н}} = \frac{K_2^{max} - K_{22}}{K_2^{max} - K_2^{min}} = \frac{6{,}0-6{,}0}{6{,}0-2{,}3} = 0;$$

$$K_{32}^{\text{Н}} = \frac{K_3^{max} - K_{32}}{K_3^{max} - K_3^{min}} = \frac{1-1}{1-0} = 0;$$

$$K_{42}^{\text{Н}} = \frac{K_3^{max} - K_{42}}{K_4^{max} - K_4^{min}} = \frac{1-0}{1-0} = 1.$$

Нормализуются факторы для варианта «Захоронение»:

$$K_{13}^{\text{Н}} = \frac{K_1^{max} - K_{13}}{K_1^{max} - K_1^{min}} = \frac{1{,}5-1{,}5}{1{,}5-1{,}0} = 0;$$

$$K_{23}^{\text{Н}} = \frac{K_2^{max} - K_{23}}{K_2^{max} - K_2^{min}} = \frac{6{,}0-2{,}3}{6{,}0-2{,}3} = 1;$$

$$K_{33}^{\text{Н}} = \frac{K_3^{max} - K_{33}}{K_3^{max} - K_3^{min}} = \frac{1-0}{1-0} = 1;$$

$$K_{43}^{\text{Н}} = \frac{K_3^{max} - K_{43}}{K_4^{max} - K_4^{min}} = \frac{1-1}{1-0} = 0.$$

Далее, для дальнейших вычислений определяются знаки нормализованных факторов. Предполагается, что оптимальный вариант ВЭ должен характеризоваться следующими факторами:

коллективная доза – предпочтительна минимизация фактора; соответственно знак нормализованного фактора не меняется (остается «+»);

затраты на реализацию – предпочтительна минимизация фактора; соответственно знак нормализованного фактора не меняется (остается «+»);

необходимость наличия захоронения – предпочтительна минимизация фактора; соответственно знак нормализованного фактора не меняется (остается «+»);

наличие персонала – персонал должен быть в наличии, поэтому минимизация по этому фактору отрицательно влияет на результат, следовательно, знак нормализованного фактора меняется на противоположный «–».

Величины безразмерных (нормализованных) форм факторов представлены в таблице № 7.

Таблица № 7

Безразмерные (нормализованные) формы факторов

Варианты ВЭ f_j	**Факторы,** $K_{ij}^{н}$			
	$K_{1j}^{н}$	$K_{2j}^{н}$	$K_{3j}^{н}$	$K_{4j}^{н}$
f_1	0,8	0,54	0	–0
f_2	1	0	0	–1
f_3	0	1	1	–0

Оценка предпочтений

Для выбора наиболее оптимального варианта ВЭ на следующем этапе определяются весовые коэффициенты для каждого фактора. Поскольку в соответствии с принципом обоснования приоритет отдается показателям здоровья, а не экономическим выгодам, наиболее приоритетным фактором

является коллективная доза. Следовательно, качественные оценки факторов выполняются следующим образом:

фактор K_{1j} – «Коллективная эффективная доза» – наиболее важен;

фактор K_{3j} – «Наличие возможности захоронения за пределами площадки ОИАЭ» – более важен, чем фактор K_{2j} «Затраты»;

фактор K_{4j} – «Наличие персонала, обладающего подробными знаниями об объекте» – равнозначен с фактором K_{2j} «Затраты».

Для наглядности:

$K_{1j} > K_{3j} > K_{2j} = K_{4j}$.

В таблице № 8 представлена матрица попарных сравнений рассматриваемых факторов.

Таблица № 8

Матрица попарных сравнений

Факторы	K_{1j}	K_{2j}	K_{3j}	K_{4j}
K_{1j}	1	1	1	1
K_{2j}	0	1	0	0,5
K_{3j}	0	1	1	1
K_{4j}	0	0,5	0	1

Тогда для факторов K_{1j} уровень важности $K_1 = 1+1+1+1 = 4$.

Для факторов K_{2j} уровень важности $K_2 = 0+1+0+0,5 = 1,5$.

Для факторов K_{3j} уровень важности $K_3 = 0+1+1+1 = 3$.

Для факторов K_{4j} уровень важности $K_4 = 0+0,5+0+1 = 1,5$.

Суммарный уровень важности всех факторов $K_c = 4+1,5+3+1,5 = 10$.

Соответственно, весовые коэффициенты каждого фактора:

$$\alpha_1 = \frac{K_1}{K_c} = 0,4;\ \alpha_2 = \frac{K_2}{K_c} = 0,15;\ \alpha_3 = \frac{K_3}{K_c} = 0,3;\ \alpha_4 = \frac{K_4}{K_c} = 0,15.$$

Оценка вариантов ВЭ

На данном этапе осуществляется расчет безразмерной функции свертки для каждого j-го варианта ВЭ путем перемножения нормализованных

факторов (таблица № 7) на соответствующие им весовые коэффициенты и суммирования полученных величин.

Для варианта «Немедленная ликвидация»:

$$\sum_{i=1}^{n} \alpha_i \cdot K_{i1}^{H} = 0{,}8 \times 0{,}4 + 0{,}54 \times 0{,}15 + 0 \times 0{,}3 - 0 \times 0{,}15 = 0{,}40.$$

Для варианта «Отложенная ликвидация»:

$$\sum_{i=1}^{n} \alpha_i \cdot K_{i2}^{H} = 1 \times 0{,}4 + 0 \times 0{,}15 + 0 \times 0{,}3 - 1 \times 0{,}15 = 0{,}25.$$

Для варианта «Захоронение»:

$$\sum_{i=1}^{n} \alpha_i \cdot K_{i3}^{H} = 0 \times 0{,}4 + 1 \times 0{,}15 + 1 \times 0{,}3 - 0 \times 0{,}15 = 0{,}45.$$

Поскольку наиболее предпочтительным является вариант с наибольшим значением функции свертки, оптимальным будет вариант «Захоронение»:

$$f_{опт.} = \max_{j} \left\{ \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \cdot K_{ij}^{H} \right\} = max\,\{0{,}40;\ 0{,}25;\ 0{,}45\} = 0{,}45.$$

ПРИЛОЖЕНИЕ № 4
к руководству по безопасности
при использовании атомной энергии
«Рекомендации по обоснованию
выбора варианта вывода
из эксплуатации объектов
использования атомной энергии»,
утвержденному приказом
Федеральной службы по
экологическому, технологическому
и атомному надзору
от «29» декабря 2018 г. № 666

Пример анализа чувствительности и определения достаточности проведенных исследований

Для проведения анализа чувствительности рассматривается следующий пример.

Постановка задачи

Предполагается, что в результате проведенных исследований получен определенный комплекс исходных данных, характеризующих свойства ОИАЭ, позволяющих провести предварительную оценку долговременной безопасности, но не позволяющих оценить достаточность проведенных исследований для выбора варианта ВЭ.

Поскольку одним из значимых факторов, величина которого влияет на выбор варианта ВЭ, является коллективная эффективная доза, необходимо оценить неопределенности величин, составляющих ее значение. Ранее было показано, что величина коллективной эффективной дозы, полученной в период потенциальной опасности захороненных РАО, весьма существенна и может повлиять на принятие решения о выборе варианта ВЭ. В связи с этим предлагается провести анализ чувствительности решения к результатам прогнозных оценок долговременной безопасности образующегося пункта захоронения РАО, которые, в свою очередь, влияют на суммарную коллективную эффективную дозу при варианте «Захоронение».

Из опыта проведения прогнозных расчетов известно, что на конечный результат наибольшее влияние оказывают несколько параметров из используемых для построения модели, а именно:

$K_{d\ инж}$ – коэффициент распределения радионуклида в материале инженерного барьера;

$K_{d\ нен}$ – коэффициент распределения радионуклида в материале ненасыщенной зоны;

$K_{d\ вод}$ – коэффициент распределения радионуклида в материале водоносного горизонта;

$n_{инж}$ – пористость материала инженерного барьера;

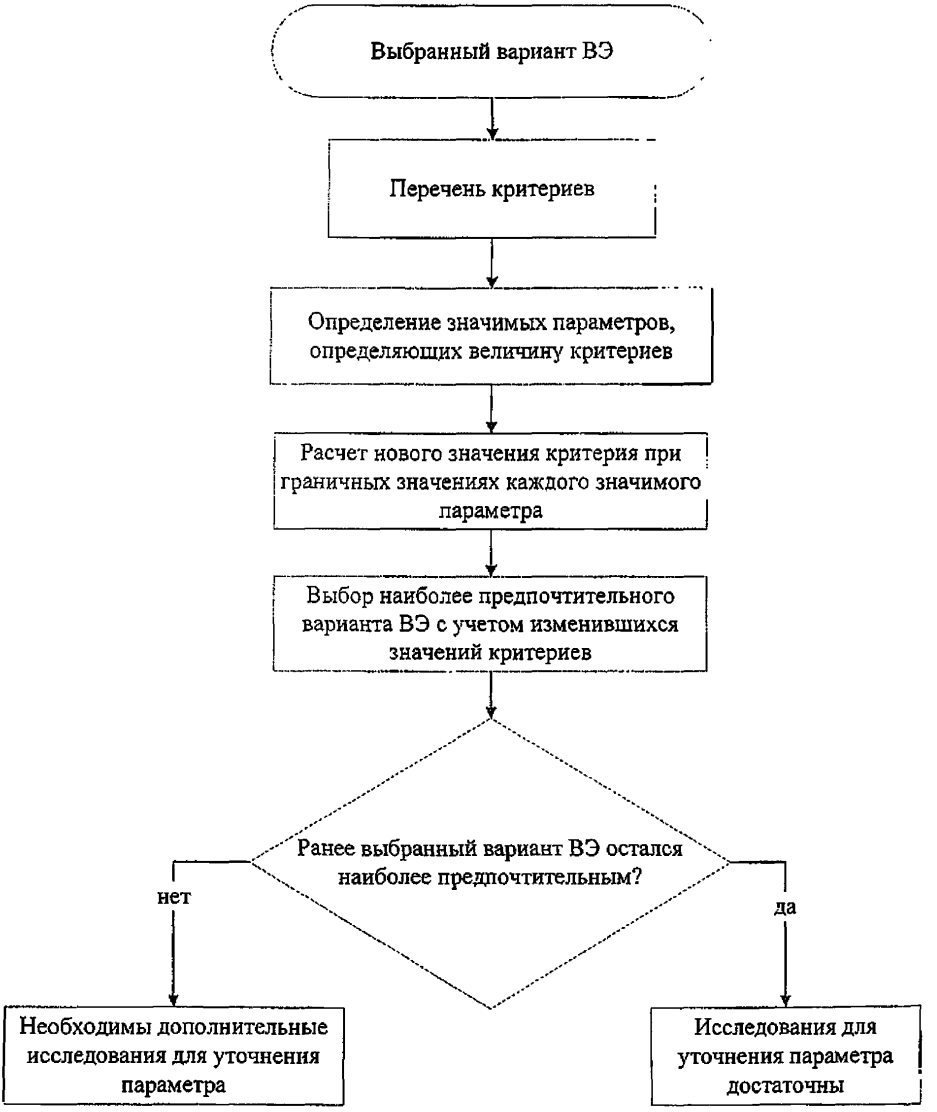
$n_{нен}$ – пористость материала ненасыщенной зоны.

Данный перечень может быть иным, однако в рамках рассматриваемого примера рассмотрены только указанные параметры.

Принимается, что в ходе проведенных исследований указанные параметры были определены с некоторыми погрешностями. Таким образом, имеется некий диапазон изменения каждого параметра.

Далее рекомендуется провести прогнозный расчет по модели с минимальным значением одного из параметров, допустим, $K_{d\ инж}$, оставляя все прочие неизменными. В результате получится некоторое значение дозы. Таким же образом необходимо рассчитать полученную прогнозную дозу, используя максимальное значение $K_{d\ инж.}$.

После этого с полученными значениями доз проводится оценка вариантов ВЭ, если при этом вариант ВЭ остался неизменным, тогда делается вывод о достаточности исследований для данного параметра. Если выбранный вариант ВЭ поменялся, делается вывод о необходимости продолжения исследований параметра для получения такого диапазона изменения его значений, при котором вариант ВЭ меняться не будет во всем диапазоне изменения значений параметра (указанный алгоритм представлен на рисунке).



Алгоритм анализа чувствительности

Пример расчета.

В рассмотренном выше примере (приложение № 3) коллективная доза, получаемая населением за счет долговременного воздействия пункта захоронения, составляет 0,5 ЕИКД.

Рассмотрим, каким образом изменится вариант ВЭ в случае, если величина $K_{d\,инж}$ будет иметь максимальное значение в исследованном диапазоне.

Допустим, что при максимальном $K_{d\,инж}$ величина дополнительной коллективной дозы за счет долговременного воздействия захоронения снизилась до 0,3 ЕИКД и, следовательно, изменилась величина суммарной коллективной дозы, рассматриваемой в качестве фактора (таблица № 9).

Таблица № 9

Коллективная эффективная доза, полученная в результате реализации *j*-го варианта ВЭ

Варианты ВЭ	**Факторы, K_{1j}**	
f_1	K_{11}	1,1
f_2	K_{12}	1,0
f_3	K_{13}	1,3

Остальные факторы, в том числе и факторы по коллективной эффективной дозе для других вариантов ВЭ, остаются неизменными.

При проведении расчетов, аналогичных рассмотренным в приложении № 3, будут получены следующие значения для нормализованных факторов (таблица № 10).

Таблица № 10

Безразмерные (нормализованные) формы факторов

Варианты ВЭ f_j	**Факторы,** $K_{ij}^{н}$			
	$K_{1j}^{н}$	$K_{2j}^{н}$	$K_{3j}^{н}$	$K_{4j}^{н}$
f_1	0,57	0,54	0	–0
f_2	1	0	0	–1
f_3	0	1	1	–0

Исходя из предположения, что предпочтения остаются те же (см. раздел «Оценка предпочтений» настоящего приложения) и весовые коэффициенты факторов не меняются, рассчитываются функции свертки.

Для варианта «Немедленная ликвидация»:

$$f_1^{\theta} = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \cdot K_{i1}^{H} = 0{,}57 \times 0{,}4 + 0{,}54 \times 0{,}15 + 0 \times 0{,}3 - 0 \times 0{,}15 = 0{,}35.$$

Для варианта «Отложенная ликвидация»:

$$f_2^{\theta} = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \cdot K_{i2}^{H} = 1 \times 0{,}4 + 0 \times 0{,}15 + 0 \times 0{,}3 - 1 \times 0{,}15 = 0{,}25.$$

Для варианта «Захоронение»:

$$f_3^{\theta} = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \cdot K_{i3}^{H} = 0 \times 0{,}4 + 1 \times 0{,}15 + 1 \times 0{,}3 - 0 \times 0{,}15 = 0{,}45.$$

Вариант ВЭ «Захоронение» остался предпочтительным.

Далее рассматривается, как изменятся предпочтения, если для расчетов будет использовано минимальное значение параметра $K_{d\,инж}$ из диапазона.

Допустим, что при минимальном значении $K_{d\,инж}$ дополнительно полученная коллективная доза увеличится до 1,3 ЕИКД, следовательно, изменится величина суммарной коллективной дозы, рассматриваемой в качестве фактора (таблица № 11).

Таблица № 11

Коллективная эффективная доза, полученная в результате реализации j-го варианта ВЭ

Варианты ВЭ	**Факторы, K_{1j} (чел.-Зв)**	
f_1	K_{11}	1,1
f_2	K_{12}	1,0
f_3	K_{13}	2,3

Остальные факторы, в том числе и фактор «коллективная эффективная доза» для других вариантов ВЭ, остаются неизменными.

Нормализованные формы факторов представлены в таблице № 12.

Таблица № 12

Безразмерные (нормализованные) формы факторов

Варианты ВЭ f_j	**Факторы,** $K_{ij}^{\text{Н}}$			
	$K_{1j}^{\text{Н}}$	$K_{2j}^{\text{Н}}$	$K_{3j}^{\text{Н}}$	$K_{4j}^{\text{Н}}$
f_1	0,92	0,54	0	–0
f_2	1	0	0	–1
f_3	0	1	1	–0

Рассчитываются функции свертки.

Для варианта «Немедленная ликвидация»:

$$f_1^{\theta} = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \cdot K_{i1}^{H} = 0{,}92 \times 0{,}4 + 0{,}54 \times 0{,}15 + 0 \times 0{,}3 - 0 \times 0{,}15 = 0{,}45.$$

Для варианта «Отложенная ликвидация»:

$$f_2^{\theta} = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \cdot K_{i2}^{H} = 1 \times 0{,}4 + 0 \times 0{,}15 + 0 \times 0{,}3 - 1 \times 0{,}15 = 0{,}25.$$

Для варианта «Захоронение»:

$$f_3^{\theta} = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \cdot K_{i3}^{H} = 0 \times 0{,}4 + 1 \times 0{,}15 + 1 \times 0{,}3 - 0 \times 0{,}15 = 0{,}45.$$

По результатам расчетов видно, что вариант ВЭ «Захоронение» перестал быть наиболее предпочтительным, равной предпочтительностью будет обладать и вариант ВЭ «Немедленная ликвидация».

По результатам проведенных оценок можно сделать вывод, что данный параметр является критичным и проведенных исследований по уточнению его значений недостаточно, чтобы однозначно выбрать вариант ВЭ.

gost.e-ecolog.ru