

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ВЫБОРА ВАРИАНТА ВЫВОДА ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

А. С. Абакумова^а, В. В. Бочкарев^а, В. В. Иванов^{б, в, 1}, А. В. Крянев^{б, в}

^а Научно-технический центр ядерной и радиационной безопасности, Москва

^б Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^в Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

Настоящая статья посвящена анализу устойчивости выбора варианта вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии. Описан алгоритм исследования изменений значений факторов от изменений параметров, характеризующих рассматриваемый объект использования атомной энергии. Приведены численные примеры, реализующие предложенные схемы расчета показателей, определяющих наиболее предпочтительные варианты вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии, и анализ устойчивости решения о выборе варианта вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии в зависимости от возможных значений факторов.

This paper is devoted to the analysis of the choice stability of decommissioning option for atomic energy facilities. An algorithm for studying the changes in the values of factors from the changes in the parameters characterizing the atomic energy facility is described. Numerical examples are presented that implement the proposed schemes for calculating the indices determining the most preferable options for decommissioning atomic energy facilities and analyzing the stability of the decision to choose the variant of decommissioning atomic energy facilities from possible values of the factors.

PACS: 89.60.Ec

ВВЕДЕНИЕ

В результате предварительных обследований объектов использования атомной энергии (ОИАЭ), включая комплексное инженерное и радиационное обследование (КИРО), собирается комплекс исходных данных, характеризующих ОИАЭ, позволяющий провести предварительную оценку долговременной безопасности, но не позволяющий оценить достаточность проведенных исследований для выбора варианта вывода из эксплуатации (ВЭ) ОИАЭ.

Поскольку одним из значимых факторов, величина которого влияет на выбор варианта ВЭ, является коллективная эффективная доза, необходимо оценить неопределенности величин, составляющих ее значение. Так, например, для варианта «захоронение» суммарная

¹E-mail: ivanov@jinr.ru

коллективная эффективная доза (рассматриваемый фактор) складывается из дозы, полученной персоналом и населением при проведении работ по созданию пункта захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО), и из дозы, полученной населением от воздействия ПЗРО за весь период потенциальной опасности захороненных радиоактивных отходов (РАО) (см. ниже) [1–4]. Следует отметить, что величина коллективной эффективной дозы, полученной населением в течение периода потенциальной опасности захороненных РАО, весьма существенна, и она может повлиять на принятие решения о выборе варианта ВЭ. В связи с этим необходимо проводить анализ устойчивости решения о выборе варианта ВЭ в зависимости от результатов оценки долговременной безопасности образующегося ПЗРО.

В статье приведена одна из возможных математических моделей анализа влияния неопределенностей в значениях факторов на выбор варианта ВЭ ОИАЭ.

1. НОРМИРОВАНИЕ ЧИСЛОВЫХ ЗНАЧЕНИЙ ФАКТОРОВ И РАСЧЕТ КОМПЛЕКСНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВАРИАНТОВ ВЭ ОИАЭ

Рассматриваются n вариантов ($i = 1, \dots, n$) ВЭ ОИАЭ, каждый из которых характеризуется M факторами F_{ij} , $j = 1, \dots, M$, большие значения которых вносят большой вклад в решение о ВЭ ОИАЭ, и N факторами F_{ij} , $j = M + 1, \dots, M + N$, меньшие значения которых вносят большой вклад в решение о ВЭ ОИАЭ.

Произведем нормирование факторов для их объединения в один комплексный показатель для каждого варианта ВЭ ОИАЭ:

— для показателей, подлежащих максимизации,

$$F_{ij}^H = \frac{F_{ij} - F_{\min j}}{F_{\max j} - F_{\min j}}, \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, M,$$

$$F_{\min j} = \min \{F_{ij}, i = 1, \dots, n\}, \quad j = 1, \dots, M,$$

$$F_{\max j} = \max \{F_{ij}, i = 1, \dots, n\}, \quad j = 1, \dots, M,$$
(1)

где минимум (максимум) находится по $i = 1, \dots, n$;

— для показателей, подлежащих минимизации,

$$F_{ij}^H = \frac{F_{\max j} - F_{ij}}{F_{\max j} - F_{\min j}}, \quad i = 1, \dots, n, \quad j = M + 1, \dots, M + N,$$

$$F_{\min j} = \min \{F_{ij}, i = 1, \dots, n\}, \quad M + 1, \dots, M + N,$$

$$F_{\max j} = \max \{F_{ij}, i = 1, \dots, n\}, \quad j = M + 1, \dots, M + N,$$
(2)

где минимум (максимум) находится по $i = 1, \dots, n$.

Значения нормализованных комплексных показателей K_i , $i = 1, \dots, n$, для каждого варианта ВЭ подсчитываются по формуле

$$K_i = \sum_{j=1}^{M+N} w_j F_{ij}^H, \quad i = 1, \dots, n,$$
(3)

где $w_j \geq 0$, $j = 1, \dots, M + N$, $\sum_{j=1}^{M+N} w_j = 1$ — коэффициенты значимости факторов $j = 1, \dots, M + N$.

Для ВЭ ОИАЭ рассматриваются пять возможных вариантов:

- V_1 — вариант «Ликвидация ОИАЭ», реализуемый способом «Немедленная ликвидация» (далее — «немедленная ликвидация»);
- V_2 — вариант «Ликвидация ОИАЭ», реализуемый способом «Отложенная ликвидация» (далее — «отложенная ликвидация»);
- V_3 — вариант, предусматривающий создание на площадке ОИАЭ пункта захоронения РАО (далее — «захоронение»);
- V_4 — вариант «Немедленная ликвидация с частичным захоронением», предусматривающий захоронение части ОИАЭ после ликвидации ОИАЭ непосредственно после останова;
- V_5 — вариант «Отложенная ликвидация с частичным захоронением», предусматривающий захоронение части ОИАЭ после ликвидации ОИАЭ после некоторого периода (сохранения под наблюдением).

Факторы, рассматриваемые для оценки предпочтительности каждого из вариантов ВЭ:

- F_{i1} , $i = 1, 2, 3, 4, 5$, — коллективная эффективная доза, полученная в результате реализации j -го варианта ВЭ;
- F_{i2} , $i = 1, 2, 3, 4, 5$, — затраты на реализацию j -го варианта ВЭ;
- F_{i3} , $i = 1, 2, 3, 4, 5$, — необходимость наличия за пределами площадки ОИАЭ централизованных пунктов окончательной изоляции накопленных и образовавшихся в процессе ВЭ РАО для реализации j -го варианта ВЭ;
- F_{i4} , $i = 1, 2, 3, 4, 5$, — наличие персонала, обладающего подробными знаниями о данном конкретном ОИАЭ, для реализации j -го варианта ВЭ.

Пример. Значения каждого из факторов для рассматриваемых вариантов ВЭ представлены в табл. 1 (в скобках указаны нормированные значения факторов).

Таблица 1. Значения факторов для вариантов ВЭ

Вариант ВЭ	F_{i1} , чел.-Зв	F_{i2} , млрд руб.	F_{i3}	F_{i4}
V_1	1,1 (0,9)	4,0 (0,7)	1 (0,0)	1 (1,0)
V_2	1,0 (1,0)	6,0 (0,35)	1 (0,0)	0 (0,0)
V_3	1,5 (0,5)	2,3 (1,0)	0 (1,0)	1 (1,0)
V_4	2,0 (0,0)	7,0 (0,175)	0 (1,0)	1 (1,0)
V_5	1,7 (0,3)	8,0 (0,0)	0 (1,0)	0 (0,0)

Для расчета комплексного показателя используются следующие значения коэффициентов значимости факторов: $w_1 = 0,45$, $w_2 = 0,15$, $w_3 = 0,25$, $w_4 = 0,15$, полученных с помощью экспертных оценок, имеющих неопределенный характер и описываемых нечеткими множествами.

Согласно формуле (3) подсчитываем числовые значения для комплексных показателей каждого варианта ВЭ ОИАЭ:

$$K_1 = 0,9 \cdot 0,45 + 0,7 \cdot 0,15 + 0,0 \cdot 0,25 + 1,0 \cdot 0,15 = 0,66;$$

$$K_2 = 1,0 \cdot 0,45 + 0,35 \cdot 0,15 + 0,0 \cdot 0,25 + 0,0 \cdot 0,15 = 0,503;$$

$$K_3 = 0,5 \cdot 0,45 + 1,0 \cdot 0,15 + 1,0 \cdot 0,25 + 1,0 \cdot 0,15 = 0,775;$$

$$K_4 = 0,0 \cdot 0,45 + 0,175 \cdot 0,15 + 1,0 \cdot 0,25 + 1,0 \cdot 0,15 = 0,426;$$

$$K_5 = 0,3 \cdot 0,45 + 0,0 \cdot 0,15 + 1,0 \cdot 0,25 + 0,0 \cdot 0,15 = 0,385.$$

Таким образом, третий вариант, предусматривающий создание на площадке ОИАЭ пункта захоронения РАО, со значительным отрывом от других вариантов является предпочтительным для ВЭ ОИАЭ.

2. АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ВЫБОРА ВАРИАНТА ВЭ ОИАЭ

С целью определения устойчивости результатов выбора варианта ВЭ, предусматривающего создание на площадке ОИАЭ пункта захоронения РАО, в условиях неопределенности наряду с количественной оценкой факторов необходимо выяснять относительные значимости источников неопределенности, связанных с принятыми предположениями, допущениями и экспертными оценками. Относительная значимость источников неопределенности, входящих в процедуру выбора варианта ВЭ, проверяется следующим образом (рисунок):

— в качестве источников неопределенности рассматриваются значения параметров при расчете факторов, включенных в процедуру выбора варианта ВЭ;

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

— осуществляется выбор из всех параметров, использованных для количественной оценки факторов, тех, погрешности которых вносят определяющий вклад в итоговую погрешность фактора;

— повторяется процедура выбора варианта ВЭ для граничных точек диапазона изменений каждого фактора.

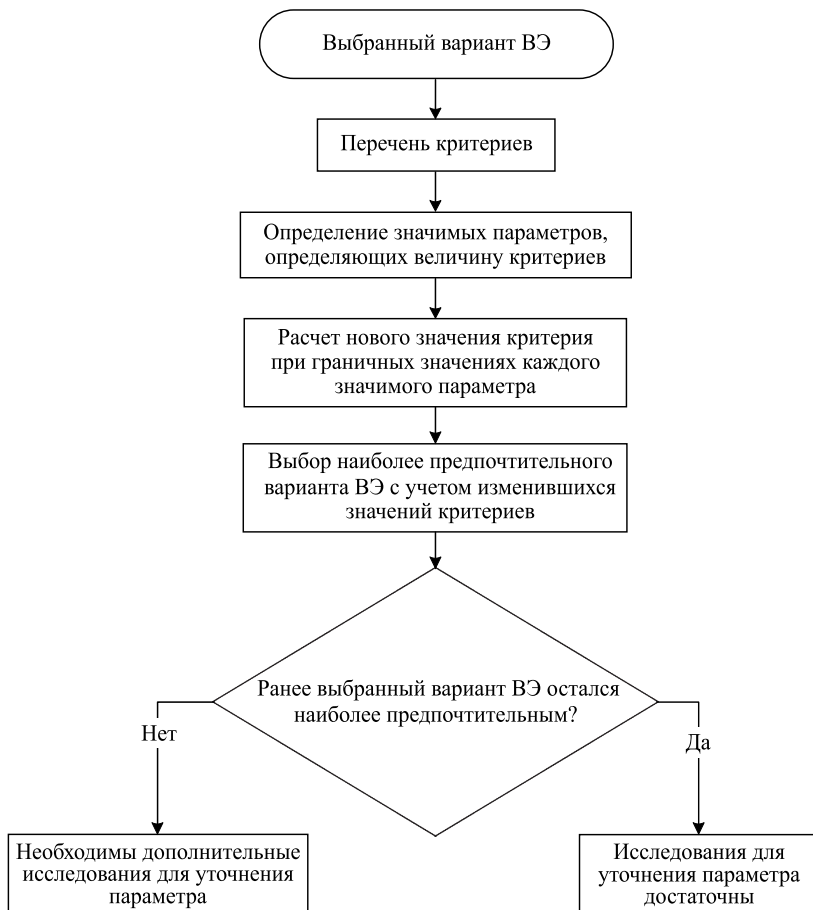
Оценка достаточности проведенных исследований для установления параметров расчетов факторов определяется следующим образом:

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

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

Для проведения анализа устойчивости рассмотрим следующий пример.

При исследовании вариантов ВЭ, связанных с захоронением, величина дозы, получаемой населением, проживающим в районе размещения ОИАЭ, от воздействия образующегося ПЗРО, является весьма важной для оценки значения фактора «суммарная коллективная эффективная доза». Дозы, полученные населением от воздействия ПЗРО, оцениваются путем проведения прогнозных расчетов миграции радионуклидов из места возможного захоронения. Из опыта проведения прогнозных расчетов известно, что на конечный результат наибольшее влияние оказывают несколько первичных параметров, используемых для построения модели, а именно:



Алгоритм проведения анализа устойчивости

- $K_{d\text{инж}}$ — коэффициент распределения радионуклида в материале инженерного барьера;
- $K_{d\text{нен}}$ — коэффициент распределения радионуклида в материале ненасыщенной зоны;
- $K_{d\text{вод}}$ — коэффициент распределения радионуклида в материале водоносного горизонта;
- $n_{\text{инж}}$ — пористость материала инженерного барьера;
- $n_{\text{нен}}$ — пористость материала ненасыщенной зоны.

Данный перечень может быть иным, однако в рамках рассматриваемого примера остановимся на указанных параметрах.

Примем, что в ходе проведенных исследований указанные параметры были определены с некоторыми погрешностями. Таким образом, имеется диапазон изменения каждого параметра, влияющего на диапазон изменения фактора. Согласно предлагаемому алгоритму вначале проведем прогнозный расчет с минимальным значением одного из параметров, например $K_{d\text{инж}}$, оставляя другие параметры неизменными. Затем таким

Таблица 2. Коллективная эффективная доза, полученная для вариантов ВЭ

Вариант ВЭ	Фактор F_{i1}	Значение, чел.-Зв
V_1	F_{11}	1,1
V_2	F_{21}	1,0
V_3	F_{31}	1,2
V_4	F_{41}	1,85
V_5	F_{51}	1,55

Таблица 3. Безразмерные (нормализованные) значения факторов

Вариант ВЭ	Фактор			
	F_{i1}^n	F_{i2}^n	F_{i3}^n	F_{i4}^n
V_1	0,8824	0,700	0,0	1,0
V_2	1,0000	0,350	0,0	0,0
V_3	0,7647	1,000	1,0	1,0
V_4	0,0000	0,175	1,0	1,0
V_5	0,3529	0,000	1,0	0,0

же образом рассчитаем полученную прогнозную дозу, используя максимальное значение $K_{d\text{инж}}$. В результате получим диапазон изменения фактора «коллективная эффективная доза».

После этого с полученными новыми значениями доз необходимо повторно провести оценку вариантов ВЭ. Если при этом выбранный вариант ВЭ остался неизменным, то делается вывод о достаточности исследований для данного фактора и устойчивости выбора варианта ВЭ. Если предварительно выбранный вариант ВЭ изменился, то следует продолжить исследования для получения такого диапазона значений фактора, при котором вариант ВЭ меняться не будет во всем диапазоне изменения фактора (см. рисунок).

Пример расчета устойчивости. Рассмотрим более подробно анализ устойчивости согласно предложенному алгоритму для примера, приведенного в разд. 1.

Рассмотрим, как изменится вариант ВЭ в случае, если величина $K_{d\text{инж}}$ будет иметь минимальное и максимальное значения в исследованном диапазоне. Допустим, что при максимальном $K_{d\text{инж}}$ величина дополнительной коллективной дозы за счет долговременного воздействия захоронения для варианта V_3 («захоронение») снизилась на 0,3 чел.-Зв, для вариантов V_4 и V_5 с частичным захоронением — на 0,15 чел.-Зв (табл. 2).

Остальные факторы остаются неизменными.

Проводя расчеты, получим следующие значения для нормализованных факторов (табл. 3).

Предполагая, что предпочтения остаются теми же и весовые коэффициенты не меняются, рассчитываем комплексные показатели для различных вариантов ВЭ:

$$K_1 = 0,8824 \cdot 0,45 + 0,7 \cdot 0,15 + 0,0 \cdot 0,25 + 1,0 \cdot 0,15 = 0,652;$$

$$K_2 = 1,0 \cdot 0,45 + 0,35 \cdot 0,15 + 0,0 \cdot 0,25 + 0,0 \cdot 0,15 = 0,653;$$

$$K_3 = 0,7647 \cdot 0,45 + 1,0 \cdot 0,15 + 1,0 \cdot 0,25 + 1,0 \cdot 0,15 = 0,894;$$

$$K_4 = 0,0 \cdot 0,45 + 0,175 \cdot 0,15 + 1,0 \cdot 0,25 + 1,0 \cdot 0,15 = 0,426;$$

$$K_5 = 0,3529 \cdot 0,45 + 0,0 \cdot 0,15 + 1,0 \cdot 0,25 + 0,0 \cdot 0,15 = 0,409.$$

Таблица 4. Коллективная эффективная доза, полученная для j -го варианта ВЭ

Вариант ВЭ	Фактор F_{i1}	Значение, чел.-Зв
V_1	F_{11}	1,1
V_2	F_{21}	1,0
V_3	F_{31}	2,0
V_4	F_{41}	2,2
V_5	F_{51}	1,9

Таблица 5. Безразмерные (нормализованные) значения факторов

Вариант ВЭ	Фактор			
	F_{i1}^n	F_{i2}^n	F_{i3}^n	F_{i4}^n
V_1	0,917	0,700	0,0	1,0
V_2	1,000	0,350	0,0	0,0
V_3	0,167	1,000	1,0	1,0
V_4	0,000	0,175	1,0	1,0
V_5	0,250	0,000	1,0	0,0

Вариант ВЭ «захоронение» остался предпочтительным.

Теперь рассмотрим, как изменятся приоритеты, если для расчетов взять минимальное значение параметра $K_{d_{инж}}$ из диапазона его изменения.

Допустим, что дополнительно полученная коллективная доза для варианта f_3 «захоронение» увеличится по сравнению со средним значением на 0,5 чел.-Зв, для вариантов f_4 и f_5 с частичным захоронением — до 0,2 чел.-Зв (табл. 4).

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

Проводя аналогичные расчеты, получим следующие значения для нормализованных факторов (табл. 5).

Предполагая, что предпочтения остаются те же и весовые коэффициенты не меняются, рассчитываем комплексные показатели для различных вариантов ВЭ:

$$K_1 = 0,917 \cdot 0,45 + 0,7 \cdot 0,15 + 0,0 \cdot 0,25 + 1,0 \cdot 0,15 = 0,668;$$

$$K_2 = 1,0 \cdot 0,45 + 0,35 \cdot 0,15 + 0,0 \cdot 0,25 + 0,0 \cdot 0,15 = 0,482;$$

$$K_3 = 0,167 \cdot 0,45 + 1,0 \cdot 0,15 + 1,0 \cdot 0,25 + 1,0 \cdot 0,15 = 0,625;$$

$$K_4 = 0,0 \cdot 0,45 + 0,175 \cdot 0,15 + 1,0 \cdot 0,25 + 1,0 \cdot 0,15 = 0,426;$$

$$K_5 = 0,261 \cdot 0,45 + 0,0 \cdot 0,15 + 1,0 \cdot 0,25 + 0,0 \cdot 0,15 = 0,367.$$

Вариант ВЭ «захоронение» перестал быть предпочтительным, наиболее предпочтительным оказался вариант ВЭ «отложенная ликвидация».

По результатам проведенного анализа можно сделать вывод о недостаточности исследований параметра $K_{d_{инж}}$ при проведении оценки долговременной безопасности для расчета фактора коллективной эффективной дозы, необходимости уточнения (сужения) границ его возможных изменений и, как следствие, о недостаточности обоснования выбранного варианта ВЭ ОИАЭ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложена схема анализа неопределенностей в нахождении числовых значений факторов, влияющих на обоснование выбора варианта ВЭ ОИАЭ. Описан алгоритм исследования устойчивости выбора варианта ВЭ ОИАЭ в зависимости от изменений значений факторов для рассматриваемого ОИАЭ. Изучены пять возможных вариантов ВЭ ОИАЭ и четыре основных фактора, которые влияют на ВЭ ОИАЭ. Представлены численные примеры, реализующие предложенную схему расчета комплексных показателей, определяющих предпочтительные варианты ВЭ ОИАЭ. Проведенный численный анализ устойчивости выбора варианта ВЭ рассматриваемого ОИАЭ в условиях неопределенности значений основного фактора — «эффективной дозы облучения» — показал, что предпочтительный ВЭ ОИАЭ зависит от изменения этого фактора в заданных пределах его возможных изменений и, следовательно, необходимы дополнительные исследования по уточнению возможных значений фактора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Experience Using Phenomena Identification and Ranking Technique (PIRT) for Nuclear Analysis. BNL-76750-2006-CP. Brookhaven Nat. Lab., 2006.
2. Wilson G. E., Boyack B. E. The Role of the PIRT Process in Experiments, Code Development and Code Applications Associated with Reactor Safety Analysis // Nucl. Engin. Design. 1998. V. 186, Nos. 1–2. P. 23–37.
3. The Radiological Hazard Potential: A Progress Measure for Nuclear Cleanup. Nuclear Decommissioning Authority, 2006.
4. Ковальчук Д. В., Бирюков Д. В., Самойлов А. А. Методика определения комплексного показателя потенциальной опасности ядерно- и радиационно опасных объектов для населения и окружающей среды. ИБРАЭ РАН, 2014.

Получено 19 августа 2018 г.