

ПОДХОДЫ И МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ ДОЛГОСРОЧНОЙ СТРАТЕГИИ ВЫВОДА ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ ЯДЕРНОГО НАСЛЕДИЯ

Д. Ф. Ильясов

Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова,
Москва, Россия

В статье рассмотрен новый подход к формированию возможных вариантов долгосрочных стратегий вывода из эксплуатации объектов ядерного наследия, базирующийся на решении оптимизационной задачи с критериями на минимум издержек и ограничениями по ресурсам, радиационным рискам и продолжительности периода их реализации. Предложены варианты критериев и ограничений стратегий вывода из эксплуатации объектов ядерного наследия, различающихся по составу соответствующих показателей. Рассмотрены методы решения оптимизационной задачи, базирующиеся на принципах динамического программирования, и приведен демонстрационный пример получения решения. Обсуждены преимущества и недостатки предлагаемого подхода по сравнению с применяемыми в мировой и российской практике методами приоритизации последовательности вывода из эксплуатации объектов. Проанализированы перспективы применения предложенного в работе подхода для разработки долгосрочной дорожной карты решения проблем ядерного наследия в Российской Федерации.

Ключевые слова: ранжирование, оптимизация, динамическое программирование, издержки, радиационные риски, инвестиционный потенциал, социально-экономический потенциал.

APPROACHES AND METHODS OF OPTIMIZING LONG-TERM STRATEGY OF PULLING PROJECTS OF NUCLEAR LEGACY OUT OF OPERATION

Damir F. Ilyasov

Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia

The article studies a new approach to shaping possible variants of long-term strategies of pulling projects of nuclear legacy out of operation, which is based on optimization with criteria on min costs and restrictions on resources, radioactive risks and duration of the implementation period. The author put forward different variants of criteria and restrictions of strategy of pulling projects of nuclear legacy out of operation. Methods of resolving the task of optimization were studied that are based on principles of dynamic programming and an example of getting a solution was demonstrated. Benefits and drawbacks of the approach were discussed in comparison with accepted in global and Russian practice methods of prioritization of the procedure of pulling projects out of operation. The article analyzed prospects of using the proposed approach for the development of long-term road map aimed at settling problems of nuclear legacy in the Russian Federation.

Keywords: rating, optimization, dynamic programming, costs, radioactive risks, investment potential, social and economic potential.

Введение

Решение проблемы вывода из эксплуатации (ВЭ) объектов ядерного наследия (ОЯН) является необходимым условием дальнейшего развития

атомного энергопромышленного комплекса в ведущих атомных державах. В настоящий момент в странах с развитым ядерным оружейным комплексом (США, Великобритания, Российская Федерация) сло-

жилась схожая ситуация: накоплено большое количество ядерно и радиационно опасных объектов (ЯРОО), эксплуатация которых по проектному назначению прекращена, и радиоактивных отходов (РАО) в пунктах хранения [6]. Ликвидация таких объектов требует значительных финансовых ресурсов, подготовки специальных кадров, инвестиций в научные исследования по разработке безопасных и эффективных проектных решений. Для финансирования этой проблемы развернуты федеральные программы с высокой долей государственного участия [5].

В России, учитывая объем текущего и планового финансирования процессов ВЭ ОЯН в ближайшее десятилетие, очевидной становится ситуация кратного увеличения числа остановленных ЯРОО. Растущее количество не выведенных из эксплуатации ЯРОО и значительное время (может достигать нескольких десятилетий) нахождения их в режиме окончательного останова под наблюдением (особенно в режиме холодной консервации, когда отключены все ресурсные системы) сопряжено с рядом рисков и издержек. В первую очередь перенос сроков ВЭ повышает риски инцидентов с радиационными последствиями в результате износа инфраструктуры и стойкости инженерных барьеров безопасности. Во-вторых, перенос сроков ВЭ объектов ведет к росту операционных затрат на поддержание их в безопасном состоянии (ПБС) и капитальных затрат на ликвидацию в будущем.

Ограниченность ресурсов и отсутствие полного набора технических средств и проектных решений для ликвидации ряда ЯРОО делают проблему ВЭ ОЯН долгосрочной. При этом имеется высокий потенциал снижения совокупных издержек при решении данной проблемы за счет обоснования временной приоритизации ВЭ объектов (определения оптимальных сроков начала выполнения работ для объектов и площадок их размещения) и определения оптимальных вариантов конечного и целевого состояния площадок их раз-

мещения. В рамках долгосрочной государственной стратегии ВЭ ОЯН эти вопросы должны системно и комплексно рассматриваться в совокупности с планами по развитию технологий и инфраструктуры для обращения с РАО.

В соответствии с РБ-153-18 в Российской Федерации могут рассматриваться следующие варианты ВЭ:

- немедленный демонтаж объекта в относительно короткие сроки после его останова;
- отложенный демонтаж – консервация объекта на длительный срок после останова с последующей его ликвидацией;
- захоронение на месте, предполагающее бессрочное содержание в законсервированном состоянии частично или полностью демонтированного объекта, не представляющего значительной угрозы для окружающей среды и населения в долгосрочной перспективе.

Частными примерами вариантов конечного состояния могут быть «зеленая лужайка» (снимаются все ограничения по дальнейшему использованию площадки) и «коричневая лужайка» (площадка используется только для промышленного назначения). В ряде случаев на ЯРОО могут осуществляться работы по снижению уровней радиационного и химического загрязнения без сноса здания и проводиться перепрофилирование объекта под новые виды деятельности.

Определенное разнообразие стратегий ВЭ ОЯН в условиях ограниченности выделяемых на решение проблемы финансовых ресурсов вызывает необходимость разработки подходов к централизованной рационализации их расходования по всей совокупности ОЯН с учетом требований обеспечения радиационной безопасности. В этой связи следует понимать, что варианты конечного состояния отличаются по размеру расходуемых на реализацию ресурсов и их распределению во времени, показателям долгосрочной радиационной безопасности. В настоящий момент в Российской Федерации в рамках атомной от-

расли системно проводится работа по обоснованию оптимального конечного состояния площадок с остановленными ЯРОО, разрабатываются методология исследования и специализированные цифровые продукты для выполнения многовариантных расчетов [3].

Активно прорабатываются вопросы разработки методов ранжирования объектов по началу их ВЭ. При приоритизации объектов следует учитывать ряд характеристик площадок их размещения, в первую очередь таких, как экологические, радиационные и прочие риски обеспечения безопасности населения, финансовые и технические ограничения проекта ВЭ, социально-экономические особенности региона размещения ЯРОО (потенциальные социально-экономические эффекты для региона при реализации проекта), в частности, инвестиционную привлекательность территории размещения ЯРОО [1].

Задача оптимизации во времени ВЭ ЯРОО является многокритериальной, причем показатели для оценки этих критериев измеряются в различных шкалах и метриках, что делает ее нетривиальной. Ранее в России при обосновании включения ЯРОО в перечень мероприятий по ВЭ в рамках Федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 годы и на период до 2035 года» использовался комплексный показатель опасности, оцененный для каждого объекта. Показатель учитывает активность радиоактивных материалов, которые находятся на объекте, их агрегатное состояние, уровень неопределенностей свойств отходов, состояние объекта и барьеров безопасности [7]. Разработанная на его основе методика позволила выявить объекты, решение по приведению в безопасное состояние которых имело неотложный характер для обеспечения радиационной безопасности. На наш взгляд, в условиях стабилизации радиационной обстановки вокруг объекта целесообразно также учитывать финансовые и социаль-

но-экономические характеристики работ по его ВЭ.

В мировой практике существует несколько методов решения аналогичных задач. Например, в Великобритании управлением ВЭ ОЯН мирного назначения занимается организация Nuclear Decommissioning Authority (NDA). Для решения задачи приоритизации эта организация использует базовую скоринговую модель для оценки опасности объектов, где результаты скоринга корректируются с учетом социально-экономических факторов¹. Преимуществом такого метода является простота применения скоринговой модели для ранжирования объектов, недостатком – сложность обоснования объективности полученных на ее основе результатов.

Еще одним подходом к ранжированию ЯРОО по началу периода ВЭ является их разделение на две группы: на объекты с высоким уровнем потенциальной опасности и с высоким социально-экономическим потенциалом – с формированием для каждой из них программ с различными источниками финансирования и последующим ранжированием по соответствующим показателям в рамках каждой программы. Такой подход используется Агентством по экологической безопасности США (United States Environmental Protection Agency – EPA). Его преимуществом является прозрачность методики ранжирования объектов внутри каждой программы, недостатком – необходимость в 2 раза большего административного ресурса для сопровождения каждой программы и обоснования их бюджетов.

Альтернативным методом является приоритизация ВЭ объектов на основе анализа их расположения на двухмерной матрице, где на одной шкале объекты размещаются по степени опасности для окружающей среды, а на другой шкале – по

¹ URL: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1022217/The_NDA_Value_Framework_Aug21.pdf

финансовым и социально-экономическим характеристикам (стоимость реализации проекта по ВЭ: объекты с низкой стоимостью и высоким социально-экономическим потенциалом для региона располагаются правее), как это показано на рисунке. Очевидно, что самые опасные объекты, для которых стоимость ВЭ незначительна, а реализация проекта будет иметь высокую социально-экономическую значимость для региона, должны выводиться из эксплуатации в первую очередь.



Рис. Матрица приоритизации вывода из эксплуатации объектов ядерного наследия

$$\sum_{i=1}^N \sum_{t=t_b}^{t_e} CE_{it}(V) + \sum_{i=1}^N \sum_{t=t_b}^{t_e} OE_{it} + \sum_{i=1}^N RR_i(V) + \sum_{i=1}^N RRR_i(V) \rightarrow \min. \quad (1)$$

В формуле (1) показатель $CE_{it}(V)$ – капитальные затраты на приведение к безопасному состоянию в соответствии с выбранной концепцией ВЭ V (V – обозначение варианта концепции ВЭ) i -й площадки ЯРОО (могут быть рассмотрены отдельные ЯРОО или ядерная установка и завод целиком в зависимости от проекта ВЭ) в t -м году. Все затраты целесообразно считать в ценах на год начала планирования. Временной диапазон $[t_b; t_e]$ – начало и

В рамках настоящей статьи предложен новый авторский подход к приоритизации ВЭ ЯРОО по началу периода их ВЭ, базирующийся на решении оптимизационной задачи с критериями на минимум издержек этого процесса и ограничениями по имеющимся финансовым, кадровым, временным ресурсам и радиационным рискам.

Математическая постановка задачи оптимизации стратегии вывода объектов из эксплуатации

В рамках математической постановки задачи оптимизации долгосрочной стратегии ВЭ ОЯН в качестве критерия предлагается использовать минимизацию совокупных издержек этого процесса. В составе издержек рассматриваются следующие показатели:

- капитальные затраты на приведение площадок с остановленными ЯРОО к конечному/целевому состоянию;
- операционные затраты на ПБС ЯРОО в безопасном состоянии с момента останова до начала работ по ВЭ объекта;
- радиационные риски для персонала и населения при реализации заданного для каждой площадки проекта по ВЭ;
- уровень остаточного радиационного риска после окончания работ.

В первом приближении целевую функцию данной оптимизационной задачи можно представить в виде следующего выражения:

окончание горизонта планирования; N – общее количество площадок ЯРОО.

Значения $CE_{it}(V)$ равны 0, если $t < t_{db}$ и $t > t_{db} + t_{dd} - 1$, где t_{db} – год начала ВЭ i -й площадки ЯРОО; t_{dd} – длительность реализации проекта.

Значения

$$\begin{aligned} CE_{i(t_{db})}(V) &= CE_{i1}(V), \\ CE_{i(t_{db}+1)}(V) &= CE_{i2}(V), \dots, \\ CE_{i(t_{db}+t_{dd}-1)}(V) &= CE_{i t_{dd}}(V), \end{aligned}$$

где $CE_{i1}(V), CE_{i2}(V), \dots, CE_{i t_{dd}}(V)$ – капитальные затраты на реализацию проекта по ВЭ

i -й площадки ЯРОО в 1-й, 2-й, ..., t_{dd} год в соответствии с дорожной картой проекта (с момента начала активной стадии работы).

Для ряда объектов значения капитальных затрат на ВЭ $CE_{i1}(V)$, $CE_{i2}(V)$, ..., $CE_{it_{dd}}(V)$ могут уменьшаться после определенного времени в связи со снижением активности радиоактивных материалов и, соответственно, сокращением затрат на обращение с РАО или увеличиваться в связи с износом строительных конструкций и инженерных барьеров безопасности, что также необходимо дополнительно исследовать и учитывать при определении оптимального года начала работ по ВЭ площадки. В таком случае показатель целесообразно записать как функцию от времени $CE_{it}(V, t)$. Однако в краткосрочной перспективе (до 30 лет) этими корректировками можно пренебречь. Оценка капитальных затрат в свою очередь является отдельной сложной задачей, которая может быть решена с использованием описанных в работах методов с применением цифровых технологий [3].

Показатель OE_{it} – операционные затраты на ПБС i -й площадки ЯРОО с момента останова объектов до начала их активной стадии ВЭ. Эти затраты для всей площадки изменяются во времени, и их совокупная величина по всему множеству определяется в виде суммы затрат на ПБС на остановленные объекты в соответствии с планом останова и начала ВЭ объектов [4]. Параметр начала ВЭ площадки t_{db} влияет на продолжительность накопления операционных затрат для конкретной площадки и, соответственно, на суммарное их значение в рамках горизонта планирования. OE_{it} для i -й площадки равно 0 для $t > t_{db} + t_{dd} - 1$.

Показатель $RR_i(V)$ характеризует радиационный риск для персонала и населения в активной стадии работ по ВЭ при реализации концепции ВЭ V . Прогнозирование доз облучения персонала и населения производится на этапе обоснования безопасности проекта. Методика оценки радиационного риска в стоимостной форме подробно описана в публикациях [2].

Показатель $RRR_i(V)$ характеризует уровень остаточного долгосрочного экологического и радиационного риска при достижении площадкой конечного/целевого состояния V . В случае ликвидации объекта по концепции «захоронение на месте» уровень его опасности будет больше нуля ($RRR_i > 0$), а в остальных случаях предположительно будет равен нулю ($RRR_i = 0$). В дальнейшем потребуются затраты (меньше по сравнению с затратами до консервации объекта) на техническое обслуживание и мониторинг для поддержания законсервированного объекта в безопасном состоянии. Допуская, что существует некоторый достаточный объем ежегодных затрат для сохранения объекта в безопасном состоянии в долгосрочной перспективе, их размер целесообразно принять в качестве оценок долгосрочного экологического и радиационного риска.

Таким образом, вместо показателя $\sum_{i=1}^N RRR_i(V)$ в формуле (1) можно использовать для площадок i с концепцией $V = \text{«захоронение на месте»}$ $\sum_{i=1}^N \sum_{t=t_b}^{t_e} ROE_{it}$,

где ROE_{it} – операционные затраты в t -м году на поддержание i -й площадки в безопасном состоянии после полной или частичной консервации объектов; $ROE_{it} = 0$ для $t < t_{db} + t_{dd}$. Методика оценки операционных затрат на ПБС законсервированных объектов представлена в публикации [4].

В данной статье ограничимся рассмотрением только экологических и радиационных рисков для персонала и населения. В отношении других видов рисков, прежде всего экономического характера, связанных с удорожанием стоимости работ, будем предполагать, что они уже учтены при определении затрат.

В функционале (1) также можно учесть уровень социально-экономической или инвестиционной привлекательности i -й площадки. В литературе описана методика стоимостной оценки потенциала площадки с учетом возможности ее возврата в хозяйственный оборот [1]. Этот по-

тенциал выражается в виде размера вложений, которые коммерческие структуры готовы инвестировать в процесс ВЭ за возможность дальнейшего использования освобожденной территории и инфраструктуры или государственные структуры для реализации социально-экономических выгод для общества. Обозначим

$$\sum_{i=1}^N \sum_{t=t_b}^{t_e} (CE_{it}(V, t) - IP_{it}(V, t)) + \sum_{i=1}^N \sum_{t=t_b}^{t_e} OE_{it} + \sum_{i=1}^N RR_i(V) + \sum_{t=t_b}^{t_e} \sum_{i=1}^N ROE_{it}(V) \rightarrow \min. \quad (2)$$

В функционале (2) все показатели могут быть оценены в стоимостном выражении, что снимает проблему различия метрик разнородных показателей. Переменными оптимизационной задачи являются параметры начала работ по ВЭ t_{db} и вариант конечного/целевого состояния V для каждой площадки i . Остальные параметры являются исходными данными (должны быть оценены перед началом планирования).

Для оптимизационной задачи с критерием (2) на минимум издержек следует применить следующие 3 группы ограничений: по ресурсам, нормативным ограничениям (по требованиям к обеспечению безопасности) и временным параметрам. Ограничение на располагаемые финансо-

$$\sum_{i=1}^N (CE_{i(t+m)}(V, t) - IP_{i(t+m)}(V, t)) + \sum_{i=1}^N OE_{i(t+m)} \leq F_{t+m} + FR_{t+m-1}, \quad (4)$$

где FR_t – избыток финансовых средств, накопленный к t -му году.

Кроме ограничений по финансовым ресурсам, при организации процесса ВЭ ОЯН следует учитывать и другие виды ресурсных ограничений, например, по материальным ресурсам, трудозатратам, нагрузке на инфраструктуру по кондиционированию и захоронению РАО, количеству исполнителей работ, связанных с ликвидацией объекта и восстановлением площадки. В общем виде такие ограничения можно записать в виде

$$\sum_{i=1}^N R_{jit} \leq CR_{jt}, \quad (5)$$

$IP_{it}(V, t)$ показатель социально-экономической или инвестиционной привлекательности i -й площадки при достижении целевого состояния V .

Учитывая все предложенные выше корректировки, математическая запись целевой функции оптимизационной задачи (1) преобразуется следующим образом:

вые ресурсы в каждый год можно представить в следующем виде:

$$\sum_{i=1}^N (CE_{it}(V, t) - IP_{it}(V, t)) + \sum_{i=1}^N OE_{it} \leq F_t, \quad (3)$$

где F_t – совокупные располагаемые финансовые ресурсы в году t .

Ограничение (3) может иметь несколько модификаций в зависимости от установленных правил бюджетного планирования, например, формироваться суммарно за указанный период (на 3 или 5 лет), устанавливаться отдельно для капитальных и операционных затрат, рассматриваться с учетом опции переноса неизрасходованных средств в заданном периоде на будущие календарные годы:

где R_{jit} – востребованность в j -м ресурсе в t -м году при ВЭ i -й площадки;

CR_{jt} – совокупное ограничение по j -му ресурсу в t -м году.

Ограничения по обеспечению безопасности формируются на основе действующего в России законодательства в части требований по обеспечению ядерной и радиационной безопасности при выполнении работ по ВЭ ЯРОО. Они имеют нормативный характер и сокращают возможности выбора вариантов конечного/целевого состояния V для конкретной площадки, ограничивают допустимое радиационное воздействие на население и персонал.

Временные ограничения не позволяют начать работы по ВЭ конкретной площадке пока не будут выполнены все условия:

- остановлена работа всех объектов на площадке;
- разработан и согласован проект по ВЭ площадки;
- проведены конкурсные процедуры по определению организации исполнителя и получены все необходимые лицензии для проведения работ.

Математически описанные выше ограничения можно записать для каждой i -й площадки следующим образом:

$$\begin{cases} V \in V_{av}, \\ t_{db} \geq t_s, \\ t_{db} \geq t_p, \\ t_{db} \in N, \end{cases} \quad (6)$$

где V_{av} – множество допустимых с точки зрения обеспечения экологической и радиационной безопасности вариантов конечного/целевого состояния площадки;

t_s – год полного останова площадки;

t_p – год получения исполнителем работ лицензии на ВЭ для реализации согласованного проекта.

В настоящее время существуют объекты, эксплуатируемые в режиме окончательного останова, для которых отсутствует согласованный проект по ВЭ, т. е. для таких объектов $t_p > t_s$. В будущем стремятся к практике, когда к моменту останова объекта уже будет готов согласованный проект по его ВЭ ($t_p < t_s$).

Таким образом, оптимальный план ВЭ ОЯН может быть сформирован в ходе решения оптимизационной задачи с функционалом (2) и ограничениями (4)–(6).

Методы решения задачи оптимизации стратегии вывода объектов из эксплуатации

Поскольку множество допустимых значений переменных V и t_{db} , характеризующих стратегию ВЭ ОЯН, ограничено, то оптимальное значение функционала может быть определено простым перебором всех вариантов переменных V и t_{db} для за-

данного набора площадок. Однако даже если оптимальные варианты конечного/целевого состояния площадок заранее заданы, то для набора из 15 площадок и горизонта планирования 30 лет (правдоподобный пример, учитывая данные по количеству остановленных площадок ОЯН) количество перебираемых t_{db} для объектов превысит $1,4 \cdot 10^{22}$ вариантов. Даже с учетом возможностей современной вычислительной техники перебор такого количества вариантов практически нереализуем. В связи с этим возникает проблема разработки алгоритма, упрощающего поиск решения.

Задачи, связанные с оптимальным распределением ресурсов по наборам объектов и временным периодам, относятся к задачам динамического программирования. В теории вычислительных систем этот способ применяется для решения сложных задач путем разбиения их на более простые подзадачи. Он применим к задачам с оптимальной подструктурой, представляющим собой набор перекрывающихся подзадач, сложность которых чуть меньше исходной. В этом случае время вычислений может быть значительно сокращено.

Основной подход к решению задачи динамического программирования базируется на следующем правиле, вытекающем из принципа оптимальности Беллмана: горизонт планирования $[t_b; t_e]$ может быть разбит на u периодов $[t_b; t_1], [t_1; t_2], \dots, [t_{u-1}; t_e]$. Оптимальное значение издержек от ВЭ ОЯН во всем горизонте планирования может быть получено путем оптимизации издержек ВЭ ОЯН в каждом временном интервале. Например, если горизонт планирования разбить на интервалы по 3 года (что является обоснованным с точки зрения правил бюджетного планирования на государственном уровне в Российской Федерации), то для аналогичного примера, описанного выше, размер перебираемых наборов t_{db} сокращается до менее чем 14,5 млн вариантов.

С учетом этого предлагается следующий алгоритм расчетов для поиска опти-

мального решения задачи оптимизации долгосрочной стратегии ВЭ ОЯН.

Шаг 1. В горизонте планирования $[t_b; t_1]$ производится отбор наборов значений возможных концепций ВЭ V (или конечных/целевых состояний площадки после ее ВЭ) и времени начала ВЭ t_{db} для каждой i -й площадки ЯРОО, удовлетворяющих ограничениям оптимизационной задачи.

Шаг 2. Для найденных допустимых наборов V и t_{db} определяются значения целевой функции, в результате чего выбираются оптимальные V^* и t_{db}^* , для которых издержки принимают минимальное значение. Обозначим это решение как I_1 – оптимальный набор i -х площадок, выводимых из эксплуатации в период $[t_b; t_1]$.

Шаг 3. Необходимо уточнить ограничения по имеющимся финансовым и прочим ресурсам F_t и CR_{jt} для временных промежутков $[t_1; t_2], \dots, [t_{u-1}; t_e]$ с учетом, что во временном промежутке $[t_b; t_1]$ будет начат ВЭ набора объектов I_1 .

Шаг 4. Повторить шаги 1 и 2 аналогично для временных интервалов $[t_1; t_2]$ с учетом новых ограничений $F_t | I_1$ и $CR_{jt} | I_1$ и определить оптимальный набор выводимых из эксплуатации площадок и их конечное/целевое состояние I_2 .

Шаг 5. Повторить шаги 1–4 для оставшихся интервалов $[t_2; t_3], \dots, [t_{u-1}; t_e]$ с учетом найденных на предыдущих этапах решений I_1, I_2 и определить оптимальные V и t_{db} для всех площадок ЯРОО.

Данный алгоритм запрограммирован на языке Python и успешно проявил себя в решении реальных практических задач.

Пример решения оптимизационной задачи

Рассмотрим реализацию данного алгоритма на упрощенном примере для 9 площадок с максимальным сроком ВЭ, равным 10 годам. Допустим, что все объекты площадок полностью остановлены, варианты конечного/целевого состояния площадок установлены согласованным проектом ВЭ. В табл. 1 представлено распределение затрат на ВЭ площадок для каждого года активной стадии ликвидации ($CE_{it}(V)$), в табл. 2 – распределение затрат на ПБС (в столбце 0 – ежегодные затраты до начала активной стадии ВЭ площадки, в столбцах 1–10 – значения в соответствующий год с момента начала активной стадии ВЭ).

Т а б л и ц а 1
Затраты на ВЭ площадок для каждого года активной стадии ликвидации (в у. е.)

Номер площадки	Номер года ВЭ									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Площадка 1	15	13	12	11	10	10	10	8		
Площадка 2	11	13	15	17	9	8	5	6	7	
Площадка 3	11	11	11	11	11	11	6			
Площадка 4	15	13	14	17	18	9	7			
Площадка 5	5	5	6	7	5	4	2	2	2	1
Площадка 6	13	12	11	14	10	9	5			
Площадка 7	19	10	10	10	15	16	0			
Площадка 8	5	6	4	3	7	13	10			
Площадка 9	6	7	8	4	11	12	13			

Т а б л и ц а 2
Затраты на ПБС площадок для каждого года ликвидации (в у. е.)

Номер площадки	Номер года ВЭ										
	0*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Площадка 1	14,00	12,60	11,34	10,21	9,19	8,27	7,44	6,70	6,03	-	-
Площадка 2	10,00	9,00	8,10	7,29	6,56	5,90	5,31	4,78	4,30	3,87	-
Площадка 3	8,00	7,20	6,48	5,83	5,25	4,72	4,25	3,83	-	-	-
Площадка 4	10,00	9,00	8,10	7,29	6,56	5,90	5,31	-	-	-	-
Площадка 5	3,00	2,70	2,43	2,19	1,97	1,77	1,59	1,43	1,29	1,16	-
Площадка 6	8,00	7,20	6,48	5,83	5,25	4,72	4,25	3,83	-	-	-
Площадка 7	12,00	10,80	9,72	8,75	7,87	7,09	6,38	-	-	-	-
Площадка 8	3,00	2,70	2,43	2,19	1,97	1,77	1,59	1,43	-	-	-
Площадка 9	3,00	2,70	2,43	2,19	1,97	1,77	1,59	1,43	-	-	-

* Ежегодные затраты на ПБС площадки во все годы до начала активной стадии ВЭ площадки.

В качестве начальной точки для формирования плана-графика примем 2024 г. В упрощенном примере установим единственное ограничение на ежегодные капитальные затраты в размере 50 условных единиц в год. Уровни радиационного риска для персонала и населения при реализации проекта ВЭ и остаточного радиационного риска после окончания работ, а также параметр социально-экономической и инвестиционной привлекательности в примере не учитываются.

Последовательно выполним шаги 1–5 из вышеприведенного алгоритма для 3-летних интервалов. Из возможных 19 683 вариантов набора t_{db} для 1-го временного интервала 2024–2026 гг. ограничению по финансовым ресурсам соответствуют 963 варианта. Из допустимых вариантов методом перебора находим, что минимальное значение функции издержек достигается при начале ВЭ площадок 1, 2, 7 и 8 в 2024 г.

Для проведения последующих расчетов вычисляются финансовые ограничения для следующих лет с учетом этого решения в интервале 2024–2026 гг. В данной постановке оптимизационной задачи остатки финансовых ресурсов переносятся на следующие временные интервалы, как показано в ограничении (4).

На второй итерации из расчета исключаются площадки, начало ВЭ которых осуществляется в период 2024–2026 гг. (площадки 1, 2, 7 и 8). Рассматриваемый временной интервал на второй итерации – 2027–2029 гг., количество всех возможных комбинаций t_{db} составляет 729 вариантов. Оптимальное решение – ВЭ площадок 4 и 6 в 2029 г.

Повторяя данный алгоритм, пока для всех площадок не будет определено оптимальное значение t_{db} , получим оптимальный временной план ВЭ площадок, представленный в табл. 3.

Таблица 3

Оптимальный план-график ВЭ площадок ЯРОО

Номер площадки	Год начала ВЭ	Год окончания ВЭ	Итого капитальные затраты, у. е.	Итого операционные затраты, у. е.
Площадка 1	2024	2031	89	71,76
Площадка 2	2024	2030	91	55,13
Площадка 3	2032	2038	72	101,56
Площадка 4	2029	2035	93	92,17
Площадка 5	2033	2042	39	43,54
Площадка 6	2029	2035	74	77,56
Площадка 7	2024	2030	80	50,60
Площадка 8	2024	2030	48	14,09
Площадка 9	2031	2037	61	35,09

В результате совокупные капитальные затраты на ВЭ всех площадок ЯРОО составят 647 у. е., операционные затраты – 541,5 у. е., общие издержки – 1 188,5 у. е.

Заключение

Разработанный подход к приоритизации ВЭ ОЯН обладает рядом преимуществ по сравнению с применяемыми на практике его аналогами. В первую очередь решена проблема приведения разнородных показателей, учитываемых при принятии решения, к единой метрике. Так, социаль-

но-экономическая и инвестиционная привлекательность территории, капитальные и операционные затраты, уровни текущих и остаточных радиационных рисков предлагается выражать в стоимостном эквиваленте. В настоящее время разработаны методики такого оценивания. В предлагаемом подходе также косвенно учитывается снижение совокупной радиационной опасности от ОЯН: за счет более эффективного распределения ресурсов темпы ВЭ объектов будут ускорены, и ликвидация всех объектов произойдет в более короткое

время. При этом размер капитальных и операционных затрат, связанных с ОЯН, также коррелирует с уровнем радиационной опасности объектов.

В авторском подходе социально-экономический и инвестиционный потенциал площадок предлагается оценить на основе рыночных методов, т. е. готовности заинтересованных структур взамен этого потенциала софинансировать процесс приведения площадки в целевое состояние. Подробнее с перспективами привлечения внешних источников финансирования для ВЭ ЯРОО можно познакомиться в публикации [1]. Сформированная в статье математическая постановка оптимизационной задачи позволяет при наличии внешних источников финансирования ВЭ ЯРОО повышать приоритет таких объектов.

Система ограничений (4)–(6) позволяет учитывать реально имеющиеся ресурсы в отрасли при формировании дорожной карты ВЭ ОЯН. Также ограничения учитывают нормативные и законодательные аспекты деятельности в Российской Федерации в части требований по обеспечению текущей и долгосрочной радиационной безопасности персонала и населения, временные ограничения на подготовку проекта ВЭ и получение разрешительных документов исполнителями на выполнение работ (лицензий).

Разработанный метод решения оптимизационной задачи, базирующийся на разделении горизонта планирования на 3-летние временные интервалы и поиске оптимального решения в этих промежутках, также хорошо встраивается в логику бюджетного планирования федеральных средств на государственном уровне в Российской Федерации. То есть на практике важно четко фиксировать план работ на ближайшие 3 года и размер необходимых для этого средств, в то время как планирование на более чем 3 года носит приблизительный характер. Таким образом, долгосрочное планирование ВЭ ОЯН может корректироваться каждые 1–3 года с учетом поступления новых статистических данных и изменения выделяемых бюджетных средств.

Очевидным недостатком предлагаемого подхода являются высокие требования к размеру и точности исходных данных для выполнения корректных расчетов. Однако за последние 10 лет в атомной отрасли выполнялось большое количество исследований для накопления и систематизации всей необходимой информации. В настоящий момент можно утверждать, что в первом приближении требуемый объем данных для реализации предлагаемых алгоритмов имеется, поэтому внедрение результатов исследования в практическую деятельность следует считать перспективным и обоснованным.

Список литературы

1. Иванов А. Ю., Ильясов Д. Ф., Мамчиц Е. Г. Развитие подходов к приоритизации вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии // Вестник Российского экономического университета имени Г. В. Плеханова. – 2023. – Т. 20. – № 4 (130). – С. 31–43.
2. Ильясов Д. Ф. Стоимостная оценка ущерба потерь здоровья населения от радиационного воздействия // РИСК: Ресурсы, Информация, Снабжение, Конкуренция. – 2014. – № 3. – С. 180–183.
3. Ильясов Д. Ф., Иванов А. Ю., Агафонов Н. П., Михайленко А. А., Овчинников И. Д., Степанян П. О. Разработка программного обеспечения для оценки стоимости проектов по ликвидации ядерно и радиационно опасных объектов с применением цифрового моделирования // Теоретическая и прикладная экономика. – 2022. – № 4. – С. 67–79.

4. Ильясов Д. Ф., Иванов А. Ю., Кузнецова Е. О. Методы прогнозирования затрат на поддержание в безопасном состоянии объектов ядерного наследия // Статистика и Экономика. – 2023. – Т. 20. – № 6. – С. 70–80.

5. Крюков О. В., Абрамов А. А. Ликвидация ядерного наследия как ключевой фактор обеспечения радиационной и экологической безопасности в Российской Федерации. По итогам реализации ФЦП ЯРБ-2 за 2016–2021 гг. // Радиоактивные отходы. – 2022. – № 1 (18). – С. 6–15.

6. Лучшие зарубежные практики вывода из эксплуатации ядерных установок и реабилитации загрязненных территорий : в 2 т. / под общ. ред. И. И. Линге, А. А. Абрамова. – М. : ИБРАЭ РАН, 2017.

7. Хамаза А. А., Бочкарев В. В., Курындин А. В., Абакумова А. С., Тихомиров Г. В. О возможности применения комплексного показателя потенциальной опасности в качестве основы дифференцированного подхода к регулированию безопасности объектов «ядерного наследия» // Ядерная и радиационная безопасность. – 2016. – № 1 (79). – С. 9–17.

References

1. Ivanov A. Yu., Ilyasov D. F., Mamchits E. G. Razvitie podkhodov k prioritizatsii vyvoda iz ekspluatatsii obektov ispolzovaniya atomnoy energii [Developing Approaches to Prioritization of Pulling Projects of Nuclear Power out of Operation]. *Vestnik Rossiyskogo ekonomicheskogo universiteta imeni G. V. Plekhanova* [Vestnik of the Plekhanov Russian University of Economics], 2023, Vol. 20, No. 4 (130), pp. 31–43. (In Russ.).

2. Ilyasov D. F. Stoimostnaya otsenka ushcherba poter zdorovya naseleniya ot radiatsionnogo vozdeystviya [Cost Estimation of the Damage to Population Health Caused by Radiation]. *RISK: Resursy, Informatsiya, Snabzhenie, Konkurentsiya* [RISK: Resources, Information, Supply, Competition], 2014, No. 3. – S. 180–183. (In Russ.).

3. Ilyasov D. F., Ivanov A. Yu., Agafonov N. P., Mikhaylenko A. A., Ovchinnikov I. D., Stepanyan P. O. Razrabotka programmnoy obespecheniya dlya otsenki stoimosti proektov po likvidatsii yadernykh i radiatsionno opasnykh obektov s primeneniem tsifrovogo modelirovaniya [Developing Software for Estimating Value of Projects Aimed at Elimination of Nuclear and Radioactive Facilities with the Help of Digital Modeling]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekonomika* [Theoretical and Applied Economics], 2022, No. 4, pp. 67–79. (In Russ.).

4. Ilyasov D. F., Ivanov A. Yu., Kuznetsova E. O. Metody prognozirovaniya zatrat na podderzhanie v bezopasnom sostoyanii obektov yadernogo naslediya [Methods of Forecasting Costs of Maintaining Projects of Nuclear Legacy in Secure Condition]. *Statistika i Ekonomika* [Statistics and Economics], 2023, Vol. 20, No. 6, pp. 70–80. (In Russ.).

5. Kryukov O. V., Abramov A. A. Likvidatsiya yadernogo naslediya kak klyuchevoy faktor obespecheniya radiatsionnoy i ekologicheskoy bezopasnosti v Rossiyskoy Federatsii. Po itogam realizatsii FTSP YARB-2 za 2016–2021 gg. [Elimination of Nuclear Legacy as a Key factor of Providing Radioactive and Ecological Safety in the Russian Federation. Outcomes of Implementation FCP YaRB-2 in 2016–2021]. *Radioaktivnye otkhody* [Radioactive Wastes], 2022, No. 1 (18), pp. 6–15. (In Russ.).

6. Luchshie zarubezhnye praktiki vyvoda iz ekspluatatsii yadernykh ustanovok i reabilitatsii zagryaznennykh territoriy [Best Overseas Practices of Pulling Nuclear Plants out of

Operation and Rehabilitation of Polluted Territories], in 2 vol., edited by I. I. Linge, A. A. Abramov. Moscow, IBRAE RAN, 2017. (In Russ.).

7. Khamaza A. A., Bochkarev V. V., Kuryndin A. V., Abakumova A. S., Tikhomirov G. V. O vozmozhnosti primeneniya kompleksnogo pokazatelya potentsialnoy opasnosti v kachestve osnovy differentsirovannogo podkhoda k regulirovaniyu bezopasnosti obektov «yadernogo naslediya» [[Possibility of Using the Complex Indicator of Potential Danger as Basis of Differentiated Approach to Regulating Safety of 'Nuclear Legacy' Projects]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost* [Nuclear and Radioactive Safety], 2016, No. 1 (79), pp. 9-17. (In Russ.).

Сведения об авторе

Дамир Фатович Ильясов

кандидат экономических наук, докторант
РЭУ им. Г. В. Плеханова.

Адрес: ФГБОУ ВО «Российский экономический
университет имени Г. В. Плеханова», 109992,
Москва, Стремянный пер., д. 36.

E-mail: dilyasov90@gmail.com

Information about the author

Damir F. Ilyasov

PhD, Doctoral Student of the PRUE.

Address: Plekhanov Russian University
of Economics, 36 Stremyanny Lane,
Moscow, 109992,

Russian Federation.

E-mail: dilyasov90@gmail.com