

ПОДХОДЫ И МЕТОДЫ ОБОСНОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ СТРАТЕГИЙ ВЫВОДА ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ

Н. П. Тихомиров, Т. М. Тихомирова, Е. О. Кузнецова
Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова,
Москва, Россия

В статье рассмотрены подходы и методы определения оптимальных стратегий вывода из эксплуатации экологически опасных объектов (на примере объектов атомной промышленности), характеризующихся минимальными уровнями издержек реализации этого процесса. Для основных применяемых на практике вариантов таких стратегий – бессрочной консервации объекта, его ликвидации после временной консервации, немедленной ликвидации после прекращения деятельности – представлены задачи минимизации издержек с учетом взаимосвязей между их составляющими, среди которых выделены затраты на вывод из эксплуатации, потери от радиационного излучения в ходе этого процесса, включая рискованные потери от аварий; рискоснижающие затраты. Авторами определены закономерности изменчивости рассматриваемых затрат во времени с учетом особенностей их амортизации в зависимости от снижения уровня излучения от остановленного объекта и связанных с ним потерь здоровья и жизни персонала, осуществляющего его вывод из эксплуатации, возможного увеличения рисков аварий и необходимости ликвидации их последствий. Рассмотрены возможности снижения потерь здоровья и жизни ликвидаторов за счет увеличения сменности их работы. Определены условия, предопределяющие преимущества рассмотренных вариантов стратегий, и приведены примеры их использования в США, Великобритании и России.

Ключевые слова: стратегия, консервация, ликвидация, излучение, затраты, потери, риски, минимизация.

APPROACHES AND METHODS OF SUBSTANTIATING RATIONAL STRATEGIES TO PULL OUT OF OPERATION ECOLOGICALLY DANGEROUS PROJECTS

**Nikolay P. Tikhomirov, Tatiana M. Tikhomirova,
Ekaterina O. Kuznetsova**
Plekhanov Russian Economic University,
Moscow, Russia

The article studies approaches and methods to finding optimum strategies to pull out of operation ecologically dangerous projects (illustrated by projects of nuclear industry) that are characterized by minimum costs of this process. For key variants of this strategy used in practice, i.e. permanent conservation of the project, its liquidation after temporary conservation, immediate liquidation after work ceasing the authors put forward tasks of cost minimization that takes into account interaction between their components, among which the following costs were identified: pulling out of operation, losses caused by radioactive emanation during the process, including risky losses of accidents, risk-cutting costs. The authors found regularities in cost changeability over time with due regard to features of their amortization depending on decreasing level of radiation from project brought to a stop and personnel health and life damage connected with it, who carry out its pulling out of operation, possible rise in accident risks and the necessity to eliminate their after-effects. Opportunities to cut damage to health and life of liquidators at the expense of changing shifts were studied. Conditions providing benefits of the mentioned strategy variants were demonstrated and examples of their use in the US, Great Britain and Russia were described.

Keywords: strategy, conservation, liquidation, radiation, costs, losses, risks, minimization.

Введение

Завершающим этапом жизненного цикла экологически опасных объектов атомной, химической и некоторых других отраслей промышленности является их вывод из эксплуатации. Этот процесс для многих таких объектов сопровождается значительными издержками, основными составляющими которых являются затраты по его реализации; потери, обусловленные поступлениями в окружающую среду загрязняющих веществ от остановленных объектов, включая аварийные; затраты, направленные на предупреждение и снижение этих поступлений.

Об уровнях таких издержек свидетельствуют следующие данные. В США только на дезактивацию и снос 24 зданий и сооружений атомного объекта в Лос-Аламосе к 2011 г. было затрачено 211 млрд долларов¹, а на реализацию вывода из эксплуатации ядерного комплекса в Хэнфорде к 2070 г. планируется затратить 115 млрд долларов². Программа вывода из эксплуатации хранилища загрязненных металлических отходов в Селлафилде (Великобритания) с их извлечением к 2036 г. оценивается в 780 млрд долларов.

При нерациональной организации вывода из эксплуатации экологически опасных объектов издержки этого процесса могут быть сопоставимы с размерами дохода, прибыли, полученными в ходе их производственной деятельности, что может поставить под сомнение ее экономическую целесообразность. Это выдвигает в число актуальных направлений исследований организацию вывода из эксплуатации экологически опасных объектов с минимальными издержками, что связывается с определением рационального состава и последовательности этапов работ, переводящих каждый из объектов из его рабочего (производственного) состояния в конечное послеэксплуатационное состояние, рациональных сроков начала и окончания этих

этапов, характеризующихся в совокупности более низкими уровнями издержек их реализации.

Вариантами конечных состояний экологически опасных объектов после их вывода из эксплуатации могут быть их постоянное нахождение в законсервированном виде с удалением или без удаления отходов производства, с дезактивацией или без дезактивации объектов после удаления таких отходов; немедленная или отложенная (после временной консервации) ликвидация объектов с полной или частичной реабилитацией загрязненных территорий и др. Вариантами промежуточных этапов работ по переходу к конечному состоянию экологически опасных объектов после прекращения их производственной деятельности являются переработка и захоронение отходов, их транспортировка к местам хранения, дезактивация, временная консервация объектов перед их ликвидацией, демонтаж, очистка окружающей территории и некоторые другие. При этом перевод в каждое конечное состояние объекта характеризуется определенным составом этих работ и издержками их проведения.

В такой ситуации рационализация процесса вывода из эксплуатации экологически опасного объекта может быть связана с оптимизацией по критерию минимума издержек стратегии его перехода в возможное конечное состояние и выбора варианта, характеризующегося минимальными издержками.

Рассмотрим подходы и методы решения этой проблемы для объектов атомной промышленности, в состав которых обычно включают промышленные и исследовательские ядерные установки, пункты хранения радиоактивных материалов, отработанного ядерного топлива, заводы по переработке ядерных материалов и др.

Методы исследования

В дальнейшем будем предполагать, что после вывода из эксплуатации атомный объект может находиться либо в постоянном относительно безопасном законсерви-

¹ URL: <https://www.sandia.gov/app/uploads/sites/165/2023/09/ASER-2022-SNLCA-Final.pdf>

² URL: <https://spectrum.ieee.org/hanford-nuclear-site>

рованном состоянии в существующем или частично демонтированном виде, либо ликвидирован сразу или после его временной консервации с перепрофилированием или консервацией занимаемой им территории. Стратегии перехода в любое из этих состояний должны характеризоваться минимальными издержками этого процесса, уровни которых зависят как от величин, так и от соотношений взаимосвязанных между собой затрат на проведение работ на различных его этапах, присущих им рисков и рискоснижающих затрат.

Рассмотрим задачи оценки минимальных издержек возможных стратегий вывода из эксплуатации атомных объектов с учетом характерных для них структур.

Основными элементами структуры издержек стратегии бессрочной консервации объекта являются:

- потери, вызванные влиянием находящегося в законсервированном относительно безопасном состоянии объекта на окружающую среду и население, как правило, обусловленные его радиационным излучением в допустимых пределах;
- затраты на содержание объекта в относительно безопасном состоянии, характеризующемся допустимыми уровнями радиационного излучения;
- риски нанесения ущерба окружающей среде и здоровью населения в результате аварийных случайных нарушений содержания объекта в законсервированном безопасном состоянии;
- затраты на устранение последствий аварий на объекте и его приведение в относительно безопасное состояние.

Здесь следует отметить, что затраты, с одной стороны, и потери и риски – с другой связаны обратно пропорциональными зависимостями, учитывающими также закономерности снижения радиационной активности объекта с течением времени.

В общем случае зависимость между уровнями потерь от радиоактивного излучения и затрат при содержании объекта в относительно безопасном состоянии в году

t может быть выражена следующим уравнением:

$$X_t^1 = K_x \cdot N_0 \cdot e^{-\beta t} \cdot e^{-\alpha z_t}, \quad (1)$$

где X_t^1 – уровень потерь при содержании объекта в законсервированном состоянии в году t ;

K_x – коэффициент, приводящий уровень радиационного воздействия объекта на окружающую среду и население в стоимостную оценку потерь;

N_0 – начальный уровень радиационного воздействия объекта на окружающую среду, измеряемый в показателях активности (Бк) или эффективной дозы облучения человека (Зв);

$e^{-\beta t}$ – показатель, характеризующий закономерности снижения уровня радиационного излучения объекта с течением времени согласно экспоненте;

$e^{-\alpha z_t}$ – показатель, характеризующий закономерности снижения уровня радиационного излучения в зависимости от величины затрат z_t на его содержание в относительно безопасном состоянии в году t .

Значение этих затрат в общем случае можно оценивать на основе следующего выражения:

$$z_t = z_0 - \sum_{\tau=1}^t A_{z_\tau} + \sum_{\tau=1}^t \Delta z_\tau, \quad (2)$$

где z_0 – начальный уровень затрат;

A_{z_τ} – величина амортизации затрат в году τ ;

Δz_τ – прирост затрат в году τ .

Риски по своему статистическому содержанию являются случайными величинами. В общем случае их уровни определяются распределением вероятностей потерь (в нашем случае от аварийных событий), характеризующихся значительным увеличением радиационного воздействия законсервированного объекта на окружающую среду и население. В качестве примеров таких событий можно привести протечки радионуклидов в местах захоронения жидких радиоактивных отходов в Окриджской резервации (США) с суммарной активностью от 10^{13} до $6 \cdot 10^{14}$ Бк. Аварийные выбросы йода в воздушное про-

странство в окрестностях этой резервации составили порядка $3,3 \cdot 10^{14}$ Бк [1].

По имеющимся оценкам, жители, проживающие в окрестностях мест захоронения отходов ядерного комплекса в Хэнфорде (США), могли получить от аварийных утечек в водоемы и почву радиоактивных загрязнений индивидуальную эффективную дозу облучения до 0,5 Зв в год, что примерно на 45% превышает средний уровень облучения от естественного фона за всю жизнь [5].

При оценке величины K_x МАГАТЭ рекомендует использовать нормативный подход, согласно которому потери населения от 1 чел.-Зв коллективной дозы облучения приравняются к потерям одного года жизни одного индивидуума или к одному среднелюдскому годовому ВВП [2].

Учитывая вероятностный характер рисков потерь от сверхнормативного излучения на законсервированном объекте, их средний уровень в год аварии t в общем случае можно оценить на основе следующего выражения:

$$X_t^2 = K_x \cdot p_t^a(z_t) \cdot M[f(N_t^a, z_t)], \quad (3)$$

где $p_t^a(z_t)$ – вероятность аварии на атомном объекте в году t с утечкой радиации в окружающую среду, зависящая от величины затрат на содержание объекта в относительно безопасном состоянии z_t ;

$f(N_t^a, z_t)$ – закон распределения интенсивности аварийного радиационного излучения на объекте в году t – N_t^a в зависимости от затрат z_t ;

$$X^2(t, T) = K_x \cdot p_t^a(z_t) \cdot \{M[f(N_t^a, z_t)] + \sum_{\tau=t+1}^T M[f(N_\tau^a, z_\tau^a)]\}, \quad (7)$$

где $X^2(t, T)$ – общая величина потерь от аварийного излучения за период ликвидации аварии (t, T) ;

$M[f(N_\tau^a, z_\tau^a)]$ – математическое ожидание закона распределения остаточного уровня радиационного излучения в году τ

$M[f(N_t^a, z_t)]$ – математическое ожидание закона $f(N_t^a, z_t)$.

В качестве примера зависимости вероятности аварии от затрат z_t можно привести следующее уравнение:

$$p_t^a(z_t) \approx \gamma/z_t, \quad (4)$$

где γ – коэффициент.

В качестве примера закона $f(N_t^a, z_t)$ можно привести экспоненциальное распределение:

$$f(N_t^a, z_t) = \lambda^a(z_t) e^{-\lambda^a(z_t) N_t^a}, \quad (5)$$

где $\frac{1}{\lambda^a(z_t)}$ – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение распределения (5), зависящее от величины z_t .

С учетом (4) и (5) выражение (3) приобретает следующий вид:

$$X_t^2 = K_x \cdot \frac{\gamma}{z_t} \cdot \frac{1}{\lambda^a(z_t)}. \quad (6)$$

Избыточный уровень радиационного воздействия на окружающую среду может иметь место еще некоторое время после аварии. В предположении, что закон распределения вероятностей этого уровня останется неизменным, но его параметры (в первую очередь математическое ожидание) могут измениться вследствие принятия дополнительных мер по защите от радиации, общее количество потерь от аварийного излучения можно оценить на основе следующего выражения:

$\in (t, T)$ после принятия защитных мер по его снижению z_τ^a .

В случае экспоненциального закона (5) выражение (7) можно переписать в следующем виде:

$$X^2(t, T) = K_x \cdot p_t^a(z_t) \cdot \left\{ \frac{1}{\lambda_t^a(z_t)} + \sum_{\tau=t+1}^T \frac{1}{\lambda_\tau^a(z_\tau^a)} \right\}. \quad (8)$$

Величина затрат на ликвидацию последствий аварии в году τ может быть оценена на основании выражения, аналогичного (2):

$$z_t^a = z_{0t}^a - \sum_{j=1}^{\tau} A_{z_j^a} + \sum_{j=1}^{\tau} \Delta z_j^a, \quad (9)$$

где $A_{z_j^a}$ – величина амортизации противоаварийных затрат в году $j > t$; $j = \overline{t+1, \tau}$;

τ – год окончательной ликвидации аварии;

z_{0t}^a – величина затрат на снижение уровня аварийного излучения, выделенных в год аварии t ;

Δz_j^a – прирост противоаварийных затрат в году $j > t$.

Издержки бессрочной консервации объекта определим как сумму их состав-

ляющих элементов по годам этого процесса:

- потерь при его содержании в безаварийном состоянии X_t^1 ;
- затрат на поддержание этого состояния z_t ;
- потерь от аварий на объекте $X^2(t, T)$;
- затрат на их устранение z_t^a .

При этом последние два элемента имеют вероятностный характер.

С учетом приведенных выражений этих элементов (1)–(9) задача минимизации издержек бессрочной консервации (ИБК) атомного объекта может быть сформулирована как задача минимизации математического ожидания следующего функционала:

$$M[\text{ИБК}] = K_x \sum_t X_t^1 + z_0 + \sum_t \Delta z_t + M[K_x \sum_t X^2(t, T)] + M[z_{0t}^a + \sum_{j=1}^T \Delta z_j^a] \rightarrow \min \quad (10)$$

по параметрам z_0 , z_{0t}^a , Δz_t и Δz_j^a , характеризующим изменение затрат z_t и z_t^a во времени.

В предположении о независимости вероятностей аварий в разные годы, об экспоненциальном законе распределения аварийных потерь, обратной зависимости

вероятности аварии на объекте в году t от величины затрат на поддержание его в относительно безопасном состоянии и других приведенных выше взаимосвязей между характеристиками содержания объекта критерий (10) может быть представлен в следующем виде:

$$M[\text{ИБК}] = K_x \sum_t X_t^1 + z_0 + \sum_t \Delta z_t + K_x \sum_t \frac{\gamma}{z_t} \left[\frac{1}{\lambda_t(z_t)} + \sum_{\tau=t+1}^T \frac{1}{\lambda_{\tau}(z_{\tau}^a)} \right] + \sum_t \frac{\gamma}{z_t} [z_{0t}^a + \sum_{\tau=t}^T \Delta z_{\tau}^a]. \quad (11)$$

Издержки стратегии ликвидации объекта после его временного содержания в законсервированном состоянии, как правило, с целью снижения величины радиоактивного излучения и, соответственно, рисков потерь персонала, проводящего ликвидацию, в общем случае включают в себя издержки содержания объекта в относительно безопасном состоянии на ограниченном временном интервале (до начала ликвидации), затраты на ликвидацию объекта и потери проводящего ликвидацию персонала, обусловленные избыточным излучением в ходе этого процесса.

Издержки содержания объекта до начала его ликвидации могут быть оценены на основании выражения, аналогичного (10), в котором первые три суммирования осуществляются в пределах $t = \overline{1, T}$, а последнее – в пределах $\tau = \overline{t_1, T}$, где t_1 – год начала ликвидации.

Затраты на ликвидацию объекта имеют достаточно сложную структуру, основными агрегированными элементами которой являются затраты на демонтаж строительных конструкций и затраты, связанные с обращением с радиоактивными отходами

(их вывоз, захоронение с дезактивацией или без нее и т. п.). В общем виде величину таких затрат z_{π} можно оценить по нормативам стоимости работ с учетом объемов конструкций объекта V и уровня его излучения на момент начала ликвидации N_{t_1} согласно следующему выражению:

$$z_{\pi} = \delta_{\pi}(N_{t_1})f(V, N_{t_1}), \quad (12)$$

где δ_{π} – нормативная стоимость ликвидации единицы объекта (m^3) с уровнем излучения N_{t_1} ;

t_1 – год начала ликвидации объекта;

$f(V, N_{t_1})$ – функция, характеризующая уровень сложности ликвидации объекта с параметрами объема V и уровня излучения N_{t_1} .

Примером функции $f(V, N_{t_1})$ может быть следующее выражение:

$$f(V, N_{t_1}) = V[1 + \nu \cdot \ln(N_{t_1} / N_{\delta})], \quad (13)$$

где ν – коэффициент;

N_{δ} – уровень относительно безопасного излучения, измеряемый, например, дозой 5 мЗв/год.

Потери персонала обычно оценивают величиной, пропорциональной коллективной дозе облучения, полученной ликвидаторами объекта [4]. Ее значение может быть определено с учетом времени проведения ликвидации каждым из ее участников и полученной им дозы облучения согласно следующему выражению:

$$\text{КДО}(t_1, t_2) = S \cdot d \cdot \sum_{\tau=t_1}^{t_2} N_{\tau}, \quad (14)$$

где КДО(t_1, t_2) – коллективная доза облучения, полученная ликвидаторами объекта в период ликвидации (t_1, t_2);

t_1 и t_2 – годы начала и окончания ликвидации соответственно;

S – среднее количество персонала, ежедневно участвующего в ликвидации объекта;

d – средняя доля годового времени, проведенного ликвидатором на объекте в период ликвидации (t_1, t_2).

Так, например, если ликвидатор участвовал в процессе в течение 5 лет и каждый год работал 9 месяцев с 5-дневной неделей в одну 8-часовую смену, то значение $d = 5 \cdot (9 / 12) \cdot (1 / 3) = 1,25$;

N_{τ} – эффективная доза облучения, полученная ликвидатором в год $\tau \in (t_1, t_2)$.

В предположении, что объем ликвидируемого объекта и связанная с ним интенсивность радиационного излучения в период (t_1, t_2) сокращаются по линейному закону от уровня N_{t_1} до N_{δ} , величину N_{τ} , $\tau \in (t_1, t_2)$, можно представить в следующем виде:

$$N_{\tau} = \frac{N_{t_1} - N_{\delta}}{t_2 - t_1}(\tau - t_1). \quad (15)$$

Здесь следует также учитывать, что продолжительность периода ликвидации (t_1, t_2) связана приблизительно по обратному линейному закону с количеством ликвидаторов S . Эти зависимости свидетельствуют о том, что коллективная доза облучения КДО(t_1, t_2) является постоянной величиной, не зависящей от длительности периода (t_1, t_2).

В предположении, что 1 чел.-Зв. коллективной дозы облучения приравнивается к потере одного среднестатистического ВВП, стоимостная оценка потерь ликвидаторов объекта от полученной ими дозы определяется величиной

$$X_3(t_1, t_2) = \vartheta \cdot \text{КДО}(t_1, t_2), \quad (16)$$

где ϑ – значение среднестатистического ВВП.

С учетом приведенных выше выражений (11)–(16) общая величина средних издержек стратегии ликвидации атомного объекта с его предварительной временной консервацией (ИВКЛ) может быть оценена на основе следующего выражения:

$$\begin{aligned} \text{ИВКЛ}(t_1, t_2) = & K_x \sum_{t=1}^{t_1} X_t + z_0 + \sum_{t=1}^{t_1} \Delta z_t + K_x \sum_{t=1}^{t_1} p_t^a(z_t) \left[\frac{1}{\lambda_t(z_t)} + \sum_{\tau=t+1}^T \frac{1}{\lambda_{\tau}(z_{\tau}^a)} \right] + \\ & + \sum_{t=1}^{t_1} p_t^a(z_t) [z_0^a + \sum_{\tau=t}^T \Delta z_{\tau}^a] + \delta_{\pi} \cdot V[1 + \nu \cdot \ln(N_{t_1} / N_{\delta})] + \vartheta \cdot S \cdot d \cdot \sum_{\tau=t_1}^{t_2} N_{\tau}. \end{aligned} \quad (17)$$

Минимальная величина этих издержек может быть обеспечена подбором сроков консервации и ликвидации объекта t_1 и t_2 , уровней затрат на его содержание в законсервированном состоянии z_t и затрат на снижение последствий аварий z_t^a , $t = 1, t_1$. Срочная ликвидация объекта, как правило, целесообразна либо при относительно

низких уровнях его радиоактивного излучения после останова (N_0), либо при существовании возможностей получения дохода от последующей эксплуатации занимаемой им территории [6; 8]. Ее общие издержки можно оценить на основе следующего выражения:

$$\text{ИНЛ}(0, t_2) = \delta_\pi \cdot V[1 + \nu \cdot \ln(N_0 / N_\delta)] + \vartheta \cdot S \cdot d \cdot \sum_{\tau=0}^{t_2} N_\tau, \quad (18)$$

где $\tau = 0$ отражает тот факт, что период консервации объекта $(0, t_1)$ отсутствует, т. е. его продолжительность также равна нулю. Значение N_τ в этом случае оценивается величиной

$$N_\tau = \frac{N_0 - N_\delta}{t_2} \cdot \tau. \quad (19)$$

С учетом выражения (18) обратной линейной зависимости между значениями S и t_2 можно предположить, что величина издержек немедленной ликвидации $\text{ИНЛ}(0, t_2)$ является постоянной.

Выражения (17) и (18) могут быть модернизированы с учетом возможных доходов, полученных от хозяйственного использования территорий атомных объектов после их ликвидации, или доходов, потерянных за период вывода из эксплуатации объектов вследствие неиспользования их территорий в хозяйственном обороте, на величину которых должны быть соответствующим образом изменены значения критериев $\text{ИБКЛ}(t_1, t_2)$ и $\text{ИНЛ}(0, t_2)$.

Заметим также, что стратегия срочной ликвидации объекта может быть оправдана при высоких значениях вероятностей проявления на нем аварийных ситуаций с тяжелыми последствиями. При этом преследуются цели либо приведения его в относительно безопасное законсервированное состояние, либо его полной ликвидации. В первом случае в правой части выражения (18) следует учесть издержки содержания объекта в безопасном состоянии в течение некоторого периода времени и издержки его окончательной ликвидации.

Обсуждение результатов

Стратегия бессрочной консервации атомного объекта обычно рекомендуется в отношении мест захоронения жидких радиоактивных отходов (ЖРО), для которых характерны более высокие затраты и уровни рисков загрязнения окружающей среды, угрозы здоровью и жизни персонала и населения близлежащих территорий при их ликвидации по сравнению с аналогичными показателями при содержании таких объектов в законсервированном состоянии.

Причем такая ситуация должна сохраняться в течение длительного периода времени. Имеющиеся данные свидетельствуют, что, например, стоимость работ по удалению радиоактивных отходов может быть в 200 раз выше, чем по их консервации, а соотношение уровней риска для здоровья людей, оцениваемых по коллективной дозе облучений за весь период потенциальной опасности (чел.-Зв), при таких стратегиях может составлять 10 : 1. Стратегия бессрочной консервации, в частности, была реализована в США в отношении трех реакторов, один из которых был с графитовым замедлителем и натриевым охладителем (реактор Hallom) [1].

Основным фактором, ограничивающим использование данной стратегии, могут быть высокие уровни риска загрязнения окружающей среды вследствие возможных утечек ЖРО. Причем эти риски, как правило, с течением времени возрастают в связи со снижением надежности защитных конструкций и сооружений, а их поддер-

жание в надежном состоянии требует все более значительных затрат [7; 9].

Реальность подобных инцидентов и значительные уровни экономических и социальных ущербов от их проявления, особенно в отдаленном будущем, обуславливают необходимость выделения значительных затрат на обеспечение надежности мест консервации ЖРО и ликвидацию последствий их утечек в окружающую среду [3]. Это в свою очередь снижает очевидность использования стратегии консервации мест захоронения ЖРО, а также других атомных объектов в бессрочной перспективе.

В такой ситуации альтернативой стратегии бессрочной консервации выступает стратегия ликвидации объектов после их временной консервации.

Временная консервация обычно применяется при высоких уровнях радиационного излучения от прекратившего свою деятельность атомного объекта с целью снижения потерь здоровья и жизни персонала, который должен проводить демонтаж, вывоз и захоронение загрязненных отходов и другие действия по его ликвидации.

Предполагается, что за период консервации уровень такого излучения снизится до относительно безопасных величин и ликвидаторы за время их работы получают дозы, не приносящие их здоровью существенный ущерб.

В упрощенном виде закономерности снижения дозы облучения от атомного объекта после его остановки можно описать следующим уравнением:

$$E(t) = E_0 \exp(-\mu t), \quad (20)$$

где $E(t)$ – эффективная индивидуальная доза облучения (Зв/год) через t лет после прекращения деятельности объекта;

E_0 – эффективная индивидуальная доза облучения (Зв/год) в начале этапа консервации;

μ – скорость распада радиоактивного вещества, связанная с периодом его полураспада $T_{1/2}$ следующим соотношением:

$$\exp(-\mu T_{1/2}) = 1/2. \quad (21)$$

Ликвидация объекта после его консервации в период $(0, t_1)$ признается относительно безопасной, если значение дозы $E(t)$ не превышает допустимого предела. Формально, согласно рекомендациям НРБ99 [2], индивидуальная эффективная годовая доза в 50 мЗв рассматривается как предел для персонала группы А. Однако это значение может быть увеличено в 2 раза на местном уровне и в 4 раза на федеральном уровне для добровольцев при спасении жизни людей. Возможности снижения этих пределов доз связаны с ограничением времени пребывания ликвидаторов на загрязненной территории. Это достигается путем организации сменности в их работе. Сменность может существенно поднять индивидуальный уровень допустимой эффективной дозы E . Например, при сменности, равной 10, означающей, что годовой объем работ, который может выполнить один ликвидатор, выполняют 10 человек, допустимый предел эффективной годовой индивидуальной дозы увеличивается до 500 мЗв. При этом каждый из них работает 0,1 часть года. Заметим, что в такой ситуации величина коллективной эффективной годовой дозы ликвидаторов увеличивается в 10 раз.

В целом коллективная эффективная доза облучения персонала, полученная за период ликвидации объекта, определяется путем суммирования годовых доз.

Стратегия ликвидации атомного объекта после его временной консервации является приоритетной в ведущих ядерных державах. При этом период консервации может составлять 60 и более лет. Ликвидация объекта, как правило, связана с демонтажом сооружений, переработкой отходов, например, стеклованием ЖРО 1-го класса, транспортировкой отходов к местам постоянного захоронения и их захоронением.

Стратегию срочной ликвидации атомного объекта в относительно короткий период обычно рекомендуется применять при низкой интенсивности его радиационного воздействия на окружающую среду и, соответственно, уровней риска потери

здоровья персонала и населения, а также в ситуации, когда освобождаемая от объекта территория может принести существенные дивиденды при других вариантах ее использования. Заметим, что подобные объекты обычно располагаются в населенных пунктах. В России такая стратегия использовалась при перепрофилировании Московского завода полиметаллов после 2013 г. В настоящее время рассматриваются возможности перепрофилирования Кирово-Чепецкого химического комбината и химического машиностроительного завода в городе Красноярске в отношении его уранового производства [1].

Реализация стратегии срочной ликвидации также может быть обоснована при невозможности содержания объекта в законсервированном состоянии, например, из-за высоких рисков аварий со значительной утечкой радиации, угрожающей здоровью населения, и значительными потерями территории, водных ресурсов и т. п.

Таким образом, в общем случае для каждого экологически опасного объекта можно предложить альтернативные варианты стратегий вывода его из эксплуатации. С точки зрения экономики наилучшим из них является вариант, характеризующийся минимальными издержками. При этом величина издержек каждой стратегии объекта зависит от организации процесса вывода его из эксплуатации. В такой ситуации сопоставлять альтернативные варианты стратегий целесообразно по минимально возможным значениям их издержек, оцениваемых в ходе решения задач оптимизации процесса вывода объекта из эксплуатации по соответствующему критерию с ограничениями на имеющиеся ресурсы и уровни рисков.

Выводы

Сокращение издержек вывода из эксплуатации экологически опасных объектов является важным направлением повышения эффективности их деятельности на протяжении всего жизненного цикла. Решение данной проблемы связано с опти-

мизацией возможных альтернативных стратегий реализации этого процесса по критерию минимума издержек и выбора из них варианта, характеризующегося наименьшим значением.

В качестве основных составляющих издержек обычно рассматриваются затраты на проведение работ и вывод из эксплуатации объекта (по его консервации, демонтажу, дезактивации, вывозу и захоронению отходов и т. п.), потери, обусловленные поступлением загрязнителей в окружающую среду на протяжении этого процесса, включая риски аварийного загрязнения, и рискоснижающие затраты. Обычно с ростом затрат величины потерь снижаются. В такой ситуации минимизация издержек связывается с определением значений затрат, обеспечивающих необходимое решение. При этом в рамках одного объекта на выбор стратегии определенное влияние могут оказывать существенные различия в уровнях затрат и потерь и их изменчивость во времени. В частности, стратегия бессрочной консервации хранилищ ЖРО характеризуется значительно меньшими затратами по сравнению с затратами на их ликвидацию. Однако в отдаленной перспективе обычно возрастают риски потерь от аварийных загрязнений, обусловленные износом защитных сооружений. Это в свою очередь обуславливает необходимость увеличения рискоснижающих затрат, что может снизить преимущества этой стратегии по сравнению, например, со стратегией ликвидации объекта после его временной консервации.

Временная консервация обычно рекомендуется при высоких начальных уровнях загрязнения объекта, которые могут вызвать значительные потери здоровья и жизни персонала, проводящего его немедленную ликвидацию. За период консервации этот уровень может снизиться за счет распада загрязнителей, что в свою очередь уменьшит и потери ликвидаторов. Уменьшение их индивидуальных потерь может быть обеспечено увеличением сменности работы. Однако заметим, что в

этом случае коллективные риски потерь здоровья сохраняются неизменными.

Стратегия немедленной ликвидации является преимущественной в двух случаях. Во-первых, если объект представляет серьезную угрозу вследствие существования высоких рисков аварийного загрязнения окружающей среды и связанных с ними потерь здоровья и жизни населения. В такой ситуации его ликвидация снижает их уровень. Однако часто это происходит за счет увеличения рисков здоровья и жизни персонала, проводящего ликвидацию.

Во-вторых, если объект не представляет существенной угрозы для окружающей среды и населения, а его ликвидация может принести существенные дивиденды от использования освободившейся территории.

Различия в соотношениях затрат и потерь при разных стратегиях вывода из эксплуатации экологически опасных объектов, а также на различных временных участках этого процесса и предопределяют актуальность рассматриваемой в данной работе проблематики.

Список литературы

1. Абрамов А. А., Дорофеев А. Н., Тяжкороб Ж. В. Особые радиоактивные отходы / под общ. ред. И. И. Линге. – М. : ООО «САМполиграфист», 2015.
2. Горский А. А., Перминова Г. С., Степанов В. С., Романович И. К. О нормах радиационной безопасности НРБ-99/2009 // АНРИ. – 2009. – № 4. – С. 18–20.
3. Елохин А. П., Стародубцев И. А. Оценка материальных затрат при ликвидации последствий радиоактивного загрязнения окружающей среды в результате радиационной аварии на ОИАЭ // Глобальная ядерная безопасность. – 2016. – № 3 (20). – С. 7–33.
4. Тихомиров Н. П., Арон Д. В. Критерии экономической эффективности реабилитации загрязненных территорий // Вестник Российского экономического университета имени Г. В. Плеханова. – 2017. – № 4 (94). – С. 120–125.
5. Anspaugh L. R. Health and Environmental Issues at US Nuclear Test Sites // Nuclear Physical Methods in Radioecological Investigations of Nuclear Test Sites. – Dordrecht : Springer Netherlands, 2000. – P. 45–60.
6. Bouville A. Fallout from Nuclear Weapons Tests: Environmental, Health, Political, and Sociological Considerations // Health Physics. – 2020. – Vol. 118. – N 4. – P. 360–381.
7. Gray J., Jones S. R., Smith A. D. Discharges to the Environment from the Sellafield Site, 1951–1992 // Journal of Radiological Protection. – 1995. – Vol. 15. – N 2. – P. 99.
8. Rogers J. F., Killough G. G. Historical dose Reconstruction Project: Estimating the Population at risk // Health Physics. – 1997. – Vol. 72. – N 2. – P. 186–194.
9. Widner T., Shonka J. J. Draft Final Report of the Los Alamos Historical Document Retrieval and Assessment (LAHDRA) Project. – URL: <https://stacks.cdc.gov/view/cdc/5427>

References

1. Abramov A. A., Dorofeev A. N., Tyazhkorob Zh. V. Osobyie radioaktivnye otkhody [Special Radioactive Waste], edited by I. I. Linge. Moscow, ООО «САМполиграфист», 2015. (In Russ.).
2. Gorskiy A. A., Perminova G. S., Stepanov V. S., Romanovich I. K. O normakh radiatsionnoy bezopasnosti NRB-99/2009 [On Radiation Safety Standards NRB-99/2009]. ANRI, 2009, No. 4, pp. 18–20. (In Russ.).
3. Elokhin A. P., Starodubtsev I. A. Otsenka materialnykh zatrat pri likvidatsii posledstviy radioaktivnogo zagryazneniya okruzhayushchey sredy v rezultate radiatsionnoy avarii na OIAE [Assessment of Material Costs in Eliminating the Consequences of Radioactive Contamination of the Environment as a Result of a Radiation Accident at a Nuclear Power Plant]. *Global Nuclear Safety*, 2016, No. 3 (20), pp. 7–33. (In Russ.).

4. Tikhomirov N. P., Aron D. V. Kriterii ekonomicheskoy effektivnosti reabilitatsii zagryaznennykh territoriy [Criteria for the Economic Efficiency of Rehabilitation of Contaminated Areas]. *Vestnik of the Plekhanov Russian University of Economics*, 2017, No. 4 (94), pp. 120–125. (In Russ.).
5. Anspaugh L. R. Health and Environmental Issues at US Nuclear Test Sites. *Nuclear Physical Methods in Radioecological Investigations of Nuclear Test Sites*. Dordrecht, Springer Netherlands, 2000, pp. 45–60.
6. Bouville A. Fallout from Nuclear Weapons Tests: Environmental, Health, Political, and Sociological Considerations. *Health Physics*, 2020, Vol. 118, No. 4, pp. 360–381.
7. Gray J., Jones S. R., Smith A. D. Discharges to the Environment from the Sellafield Site, 1951–1992. *Journal of Radiological Protection*, 1995, Vol. 15, No. 2, p. 99.
8. Rogers J. F., Killough G. G. Historical dose Reconstruction Project: Estimating the Population at risk. *Health physics*, 1997, Vol. 72, No. 2, pp. 186–194.
9. Widner T., Shonka J. J. Draft Final Report of the Los Alamos Historical Document Retrieval and Assessment (LAHDRA) Project. Available at: <https://stacks.cdc.gov/view/cdc/5427>

Поступила: 05.02.2025

Принята к печати: 10.03.2025

Сведения об авторах

Николай Петрович Тихомиров

доктор экономических наук, профессор,
заслуженный деятель науки
Российской Федерации, профессор кафедры
математических методов в экономике
РЭУ им. Г. В. Плеханова.
Адрес: ФГБОУ ВО «Российский экономический
университет имени Г. В. Плеханова»,
109992, Москва, Стремянный пер., д. 36.
E-mail: Tikhomirov.NP@rea.ru

Татьяна Михайловна Тихомирова

доктор экономических наук, профессор,
почетный работник высшего
профессионального образования Российской
Федерации, профессор кафедры
математических методов в экономике
РЭУ им. Г. В. Плеханова.
Адрес: ФГБОУ ВО «Российский экономический
университет имени Г. В. Плеханова», 109992,
Москва, Стремянный пер., д. 36.
E-mail: Tikhomirova.TM@rea.ru

Екатерина Олеговна Кузнецова

аспирантка кафедры
математических методов в экономике
РЭУ им. Г. В. Плеханова.
Адрес: ФГБОУ ВО «Российский экономический
университет имени Г. В. Плеханова», 109992,
Москва, Стремянный пер., д. 36.
E-mail: ekaterina.pnz@mail.ru

Information about the authors

Nikolay P. Tikhomirov

Doctor of Economics, Professor,
Honored Scientist of the Russian Federation,
Professor of the Department for Mathematical
Methods in Economics of the PRUE.
Address: Plekhanov Russian University
of Economics, 36 Stremyanny Lane,
Moscow, 109992,
Russian Federation.
E-mail: Tikhomirov.NP@rea.ru

Tatiana M. Tikhomirova

Doctor of Economics, Professor,
Honorary Worker of Higher Professional
Education of the Russian Federation,
Professor of the Department
for Mathematical Methods in Economics
of the PRUE.
Address: Plekhanov Russian University
of Economics, 36 Stremyanny Lane,
Moscow, 109992, Russian Federation.
E-mail: Tikhomirova.TM@rea.ru

Ekaterina O. Kuznetsova

Post-Graduate Student of the Department
for Mathematical Methods in Economics
of the PRUE.
Address: Plekhanov Russian University
of Economics, 36 Stremyanny Lane,
Moscow, 109992, Russian Federation.
E-mail: ekaterina.pnz@mail.ru