

СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ ВЫВОДЕ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

*В. В. Бочкарев^{а,б}, Б. Д. Бриллиантов^{а,б}, В. В. Иванов^{а,б,1},
С. Г. Климанов^а, А. В. Крянев^{а,б}*

^а Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

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

^в Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Представлена система поддержки принятия решений по выводу из эксплуатации объектов использования атомной энергии, краткое описание структуры которой приведено в «Вестнике Национального исследовательского ядерного университета "МИФИ"». В этой системе решается основная задача — выбор оптимального варианта вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии на основе многокритериального подхода. Для решения этой основной задачи в условиях неопределенности для каждого варианта вывода из эксплуатации рассматриваемого объекта использования атомной энергии по схеме Монте-Карло рассчитываются значения частных показателей. В качестве таких показателей предлагается принять стоимость и продолжительность вывода из эксплуатации, а также дозовые нагрузки на персонал и окружающую среду. На основании рассчитанных значений частных показателей для каждого варианта вывода из эксплуатации строится гистограмма распределения комплексного показателя, объединяющая частные показатели с учетом их приоритета. Оптимальный вариант вывода из эксплуатации рассматриваемого объекта использования атомной энергии составляется на основе приоритета гистограммы распределения комплексного показателя для оптимального варианта по отношению к другим рассматриваемым вариантам.

The paper presents a decision support system for the decommissioning of nuclear facilities, a brief description of the structure of which is presented in the Bulletin of NRNU MEPHI. The presented system solves the main task — the choice of the optimal option for decommissioning nuclear facilities based on a multi-criteria approach. To solve this main problem under conditions of uncertainty, for each decommissioning option of the nuclear facility under consideration, the values of partial indicators are calculated according to the Monte Carlo scheme. It is proposed that the cost and duration of decommissioning, as well as dose loads on personnel and the environment, be taken as such indicators. Based on the calculated values of partial indicators for each decommissioning option, a histogram of the distribution of a complex indicator is constructed, which combines partial indicators, taking into account their priority. The optimal option for decommissioning the

¹E-mail: ivanov@jinr.ru

considered nuclear facility is compiled on the basis of the priority of the distribution histogram of the complex indicator for the optimal option in relation to other options under consideration.

PACS: 89.60.Ec

ВВЕДЕНИЕ

Одной из особенностей современного этапа развития атомной отрасли является устойчивая тенденция увеличения числа объектов использования атомной энергии (ОИАЭ), достигающих заключительных стадий их жизненного цикла (далее — ЖЦ) — эксплуатации в режиме окончательного останова и вывода из эксплуатации (далее — ВЭ). В ближайшие годы и десятилетия предприятиям атомной отрасли предстоит выполнить большой объем работ по подготовке к ВЭ и ВЭ множества ОИАЭ различных категорий (блоков атомных станций (АС), исследовательских реакторов, объектов ядерно-топливного цикла и др.), нормативный (проектный) срок эксплуатации которых истек или истекает в связи с исчерпанием ресурса их систем (элементов) либо по иным причинам.

Подготовка к ВЭ и реализация ВЭ технически сложных ОИАЭ, относящихся, например, к вышеперечисленным категориям, как правило, являются технологически сложными и дорогостоящими процессами. Это обусловлено широким разнообразием видов выполняющихся операций в условиях их взаимного влияния друг на друга, с применением сложных технологий и оборудования. Такое влияние может проявляться как в виде взаимных ограничений на условия проведения работ (в случае их одновременного выполнения), так и в ряде случаев в зависимости возможности начала выполнения одних операций от завершения других. Многие работы (например, по дезактивации и демонтажу загрязненного оборудования, а также по обращению с радиоактивными отходами (РАО), в том числе образующимися в процессе ВЭ), наряду с высокой трудоемкостью и значительными затратами материально-технических и финансовых ресурсов на их проведение, сопряжены с радиационными опасностями для окружающей среды, населения и выполняющего работы персонала.

Таким образом, деятельность по ВЭ ОИАЭ следует рассматривать как комплекс организационных и технических мероприятий, оптимизированных с целью минимизации затрат материально-технических и финансовых ресурсов, с одной стороны, и радиационного воздействия на персонал и население и образования РАО при ВЭ — с другой [1–4].

При этом управленческие решения, связанные с планированием, подготовкой и осуществлением ВЭ, приходится принимать на всех стадиях жизненного цикла ОИАЭ. Например, на стадиях, предшествующих его эксплуатации, это:

- технические решения, направленные на обеспечение безопасности работ по ВЭ;
- выбор варианта ВЭ и соответствующего ему конечного состояния, определение мер по обращению с РАО, образующимися при ВЭ, включаемые в концепцию ВЭ и играющие роль первоначального плана ВЭ.

На стадии эксплуатации концепция ВЭ подлежит систематическому пересмотру и актуализации, а при подготовке к ВЭ на ее основе вырабатываются и принимаются решения по перечню, последовательности и срокам выполнения мероприятий

по ВЭ, включаемых в программу ВЭ. После проведения комплексного инженерно-радиационного обследования (КИРО) и уточнения характеристик текущего состояния ОИАЭ положения программы ВЭ актуализируются, а также принимаются решения по конкретным видам работ и порядку их проведения, применяемым технологиям и техническим средствам, которые составляют основу проектной документации ВЭ.

Таким образом, смысл описанного подхода к планированию и подготовке ВЭ заключается в систематическом уточнении и детализации принимаемых управленческих решений по мере приближения ОИАЭ к завершению их эксплуатации и началу работ по ВЭ и снижению уровня неопределенности как сведений о состоянии ОИАЭ на момент ВЭ, так и других факторов, влияющих на него. Такой подход позволяет обеспечить актуальность планов, оптимальность принятых решений по ВЭ и продемонстрировать их реализуемость в любой момент времени на протяжении всего периода эксплуатации ОИАЭ по его функциональному назначению.

1. ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СППОР ДЛЯ ВЭ ОИАЭ

При принятии управленческих решений по ВЭ ОИАЭ следует учитывать такие источники потенциальной опасности, как:

- активность отработавшего ядерного топлива;
- наведенная активность и загрязнение радионуклидами конструкционных материалов, оборудования и помещений ОИАЭ;
- наличие токсичных, пожароопасных и химически активных веществ в технологических узлах и оборудовании ОИАЭ;
- техническое состояние оборудования, зданий и сооружений на площадке ОИАЭ к моменту начала работ по ВЭ.

К дополнительным ограничениям, требующим учета при выработке и принятии управленческих решений по подготовке к ВЭ и ВЭ ОИАЭ, следует отнести:

- финансовые ограничения;
- требования законов, норм и правил в области использования атомной энергии (которым должны соответствовать все принимаемые решения);
- предполагаемый уровень развития и внедрения технологий по ВЭ на момент начала работ;
- опыт выполнения аналогичных проектов ВЭ;
- обеспечение проекта ВЭ персоналом, обладающим требуемыми компетенциями;
- социально-экономические условия.

Дополнительные трудности в процесс планирования и оценки материально-технических и финансовых затрат вносят:

- неполнота и недостоверность исходной информации, используемой для выработки и принятия решений (это характерно для объектов наследия, которые были созданы до установления современных требований к обеспечению ядерной и радиационной безопасности);
- трудности интерпретации, анализа, обработки больших объемов информации экспертами и согласования экспертных оценок.

Ошибки в оценках в таких условиях могут приводить в том числе к незапланированному увеличению затрат на ВЭ и срыву плановых сроков его завершения.

При принятии решений в условиях действия большого количества различных характеризующихся неопределенностью факторов актуальной задачей является разработка системы поддержки принятия решений (далее — СППР), объединяющей в себе комплекс расчетных методик, моделей и алгоритмов, обеспечивающих формирование, анализ и оценку альтернатив управленческих решений, обоснование выбора наиболее приемлемых из них в ходе планирования, подготовки и осуществления процессов ВЭ ОИАЭ и обращения с РАО как накопленных на ОИАЭ за время его эксплуатации, так и образующихся на стадии ВЭ.

К настоящему времени СППР широко применяются практически во всех областях науки и практической деятельности, требующих принятия проектных решений в условиях неопределенности. Основное назначение СППР — осуществление с применением специального математического обеспечения и средств автоматизации информационной поддержки лица, принимающего решение (ЛПР), с учетом его предпочтений и полномочий как руководителя.

В качестве одного из первых примеров успешного создания эффективной СППР можно привести разработанную Texas Instruments и эффективно внедренную компанией United Airlines систему поддержки управления расписанием полетов и регулирования загруженности аэропортов в условиях неопределенности, характерных для авиаперевозок. Результатом ее применения к задачам логистики стало повышение эффективности управления аэропортами [5].

Комплексная система, предназначенная для решения задач по поддержке деятельности по ВЭ ОИАЭ и обращению с образующимися при выполнении этой деятельности РАО, должна обеспечивать [6–14]:

- анализ состояния ОИАЭ, подлежащих ВЭ, имеющих ограничения, которые могут повлиять на ВЭ, их идентификацию и формализацию;
- выявление и ранжирование приоритетов, учет неопределенности в оценках ЛПР и формирование его предпочтений;
- формирование различных вариантов возможных решений;
- оценку возможных решений с учетом предпочтений ЛПР и внешних ограничений;
- оценку технико-экономических показателей принимаемых решений;
- выбор оптимального с точки зрения ЛПР варианта ВЭ.

Подход к формализации и решению перечисленных задач основан на определении для любого возможного решения при ВЭ набора численных значений частных показателей, отражающих его особенности и по своему смыслу являющихся показателями эффективности проектного управления.

В качестве основных показателей эффективности предлагается использовать:

- стоимость реализации решения;
- длительность реализации решения;
- дозовую нагрузку на персонал, реализующий данное решение;
- дозовую нагрузку на окружающую среду.

Сопоставление наборов значений частных показателей, найденных для множества различных возможных решений в рамках проекта ВЭ, является, в свою очередь, основой для решения задачи многокритериального выбора на конечном множестве альтернатив.

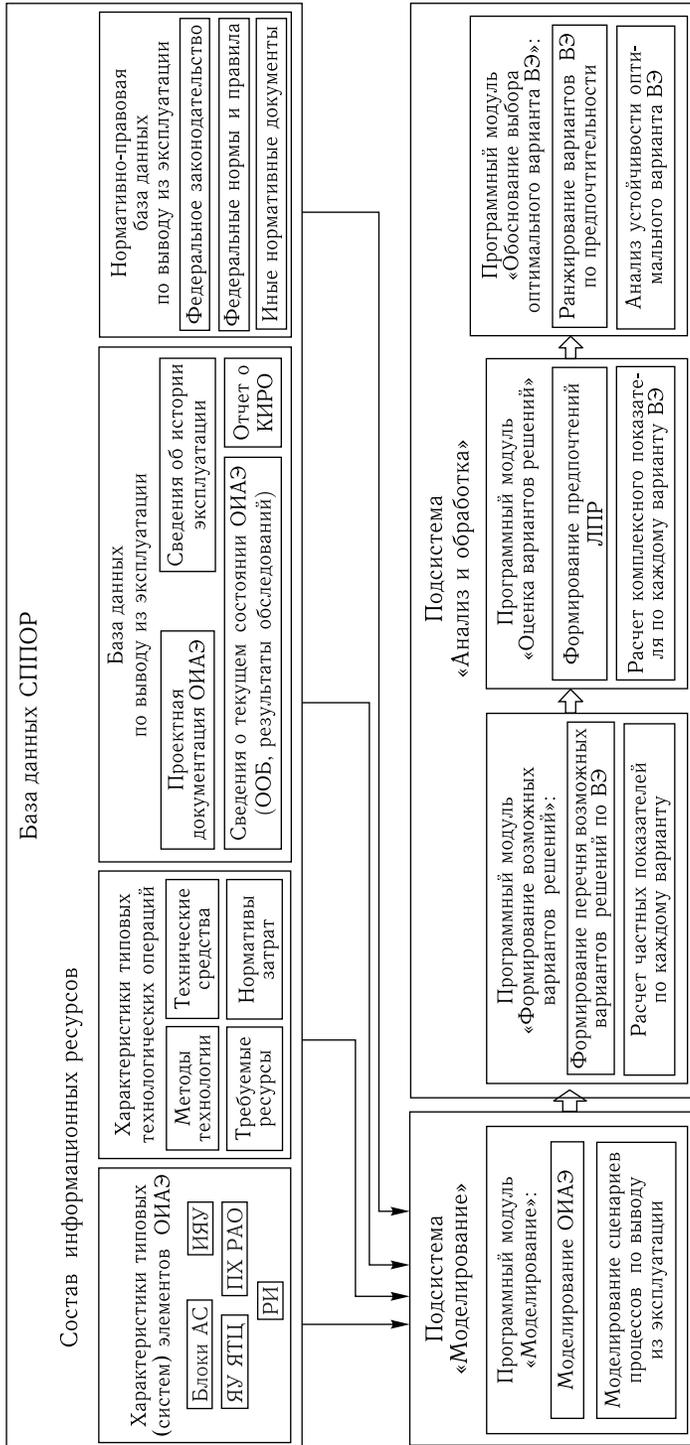


Рис. 1. Функциональная структура СПОР по ВЭ ОИАЭ

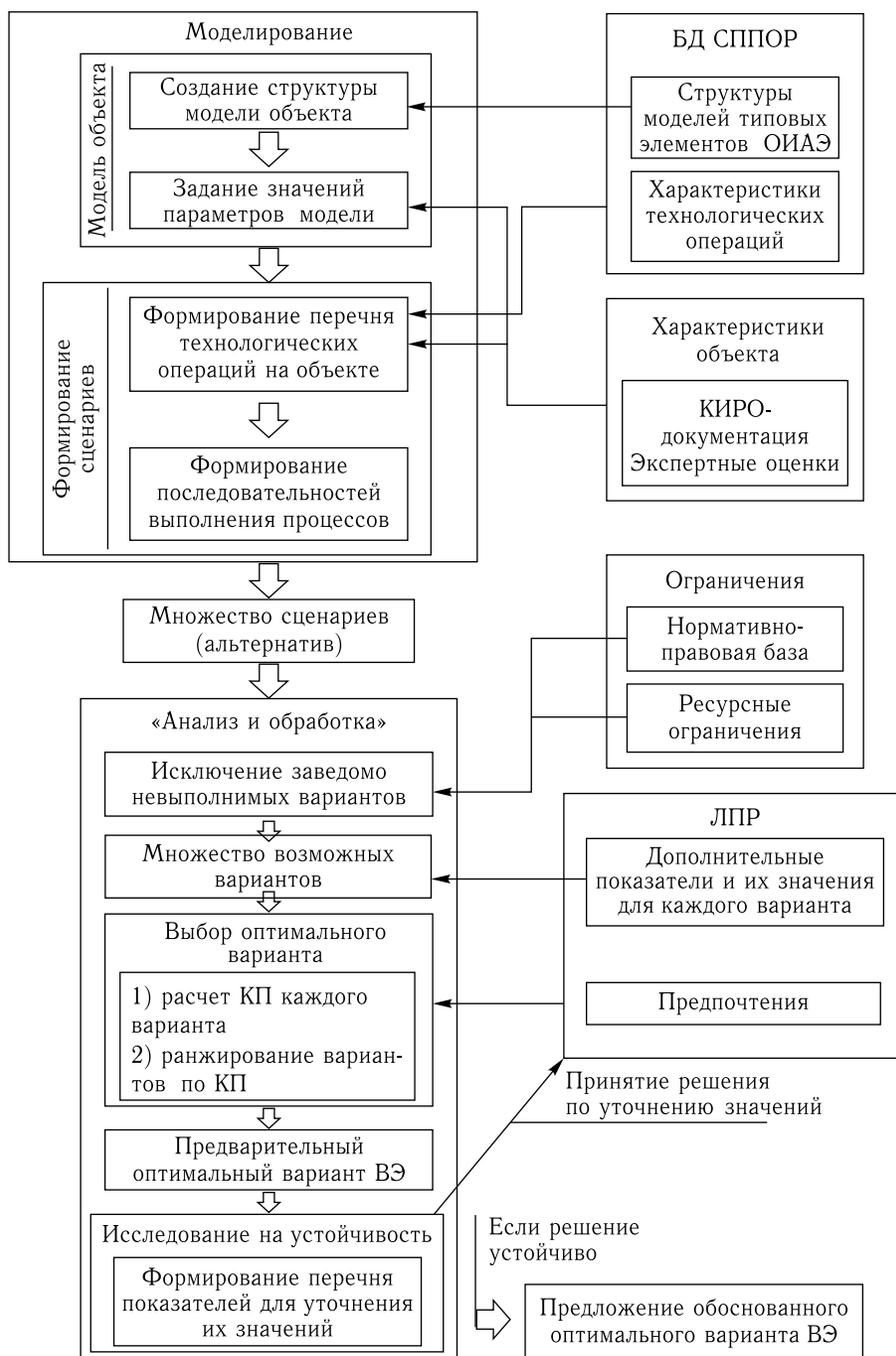


Рис. 2. Схема взаимодействия блоков СППОР

Основными подсистемами разрабатываемой системы поддержки принятия оптимальных решений (далее — СППОР) являются (см. рис. 1):

- а) база данных СППОР;
- б) подсистема моделирования ОИАЭ и сценариев ВЭ;
- в) подсистема анализа и обработки данных.

Типовой алгоритм пользователя СППОР включает следующие основные процедуры:

- 1) создание структуры модели ОИАЭ;
- 2) задание численных значений параметров модели ОИАЭ;
- 3) формирование сценариев (последовательностей выполнения операций);
- 4) если необходимо, добавление показателей ЛПР к сформированным сценариям;
- 5) задание предпочтений ЛПР (ранжирование показателей);
- 6) предварительный выбор оптимального варианта ВЭ;
- 7) исследование на устойчивость предварительно выбранного оптимального варианта ВЭ (расчет показателя устойчивости выбранного варианта).

Если показатель устойчивости выбранного варианта превышает предельно допустимый уровень (расчет показателя устойчивости см. ниже), то СППОР рекомендует ЛПР оптимальный в заданных условиях вариант ВЭ. В случае, когда из-за неопределенностей в значениях характеристик объекта оптимальное решение выбрано быть не может, формируется перечень характеристик, значения которых необходимо уточнить.

На рис. 2 представлена схема взаимодействия блоков СППОР.

2. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА

Выбору оптимального варианта ВЭ должно предшествовать создание базы данных характеристик помещений, технологического оборудования и коммуникаций рассматриваемого ОИАЭ, включая вентиляцию, промышленную канализацию, промышленные площадки и др. После получения значений оценок стоимости, времени и дозовых нагрузок для каждого варианта производится выбор оптимального варианта ВЭ.

Рассматривается N ($i = 1, \dots, N$) вариантов ВЭ ОИАЭ, каждый из которых характеризуется $M = M_1 + M_2$ частными показателями F_{ij} , где частные показатели F_{ij} , $j = 1, \dots, M_1$, при больших значениях вносят больший вклад в выбор варианта ВЭ ОИАЭ, а частные показатели F_{ij} , $j = M_1 + 1, \dots, M$, при меньших значениях вносят больший вклад в выбор варианта ВЭ ОИАЭ.

Произведем нормирование частных показателей для их объединения в один комплексный показатель для каждого ВЭ ОИАЭ:

$$F_{ij}^{\text{norm}} = \frac{(F_{ij} - F_{\min j})}{(F_{\max j} - F_{\min j})}, \quad i = 1, \dots, N, \quad j = 1, \dots, M_1; \quad (1)$$

$$F_{ij}^{\text{norm}} = \frac{(F_{\max j} - F_{ij})}{(F_{\max j} - F_{\min j})}, \quad i = 1, \dots, N, \quad j = M_1 + 1, \dots, M, \quad (2)$$

где $F_{\min j} = \min_i (F_{ij})$ и $F_{\max j} = \max_i (F_{ij})$.

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

$$K_i = \sum_{j=1}^M w_j \cdot F_{ij}^{\text{norm}}, \quad i = 1, \dots, N, \quad (3)$$

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

Выбор коэффициентов w_j значимости частных показателей j зависит от ЛПР, и алгоритм получения их значений подробно описан в статьях [10, 11]. Представленный в них метод является усовершенствованным методом из [15]. Суть алгоритма состоит в том, что ЛПР либо расставляет частные показатели в порядке приоритета по своему усмотрению, либо сравнивает значимость всех показателей попарно, выставляя коэффициент приоритета одного показателя над другим. На основе такого попарного сравнения составляется квадратная матрица Саати V размерностью M (число частных показателей, отобранных для сопоставления вариантов). Каждый элемент V_{ij} матрицы V над главной диагональю равен числовому значению отношения приоритета (значимости) i -го частного показателя над j -м частным показателем. Если, например, V_{34} равен двум, то это означает, что частный показатель с номером 3 в два раза более значим, чем фактор с номером 4. Элементы главной диагонали V_{ii} , $i = 1, \dots, M$, заполняются единицами:

$$V = \begin{pmatrix} 1 & V_{12} & V_{13} & \dots & V_{1M} \\ 1/V_{12} & 1 & V_{23} & \dots & V_{2M} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1/V_{1M} & 1/V_{2M} & 1/V_{3M} & \dots & 1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Для определения значений коэффициентов значимости показателей w_j решается задача на максимальное собственное значение матрицы V :

$$V \mathbf{x}_{\max} = \lambda_{\max} \mathbf{x}_{\max}, \quad (5)$$

где $\mathbf{x}_{\max} = (x_{1\max}, \dots, x_{M\max})^T$ — собственный вектор, соответствующий максимальному собственному значению матрицы V .

Известно, что все компоненты вектора \mathbf{x}_{\max} можно выбрать положительными, а $\lambda_{\max} \geq M$ [15].

Искомые коэффициенты значимости показателей w_j , $j = 1, \dots, M$, определяются после операции нормировки:

$$w_j = \frac{x_{j\max}}{\sum_{j=1}^M x_{j\max}}, \quad j = 1, \dots, M. \quad (6)$$

В условиях отсутствия неопределенности вариант с наибольшим значением K_i оценивается как наиболее эффективный при данных предпочтениях ЛПР.

Для учета неопределенностей в исходных значениях частных показателей используется схема Монте-Карло, применяя которую получают гистограммы распределений комплексных показателей для каждого рассматриваемого варианта ВЭ. Сравнение полученных гистограмм позволяет выбирать оптимальный вариант в условиях неопределенности в исходных данных частных показателей.

Для этого производится ранжирование комплексного показателя (3) (для каждого k -го розыгрыша значений частных показателей схемы Монте-Карло $k = \overline{1, n}$, где n — количество розыгрышей) отдельно:

$$K_{(1)k} \geq K_{(2)k} \geq \dots \geq K_{(n)k} \tag{7}$$

и подсчитывается суммарное число позиций в (7) для каждого варианта ВЭ:

$$n_i^+ = \sum_{k=1}^n (n)_{(i_k)k}, \quad i = \overline{1, N}, \tag{8}$$

где $(n)_{(i_k)k}$ — номер позиции i -го варианта ВЭ при k -м розыгрыше.

Вариант i^* с наименьшим $n_{i^*}^+$ ($n_{i^*}^+ = \min_{i=\overline{1, N}}\{n_i^+\}$) является оптимальным.

В частности, если $n_{i^*}^+ = n$ (минимально возможное), то вариант ВЭ с номером i^* назовем абсолютно приоритетным или абсолютно устойчивым, в противном случае, если $n_{i^*}^+ > n$, то вариант с номером i^* будем называть относительно устойчивым.

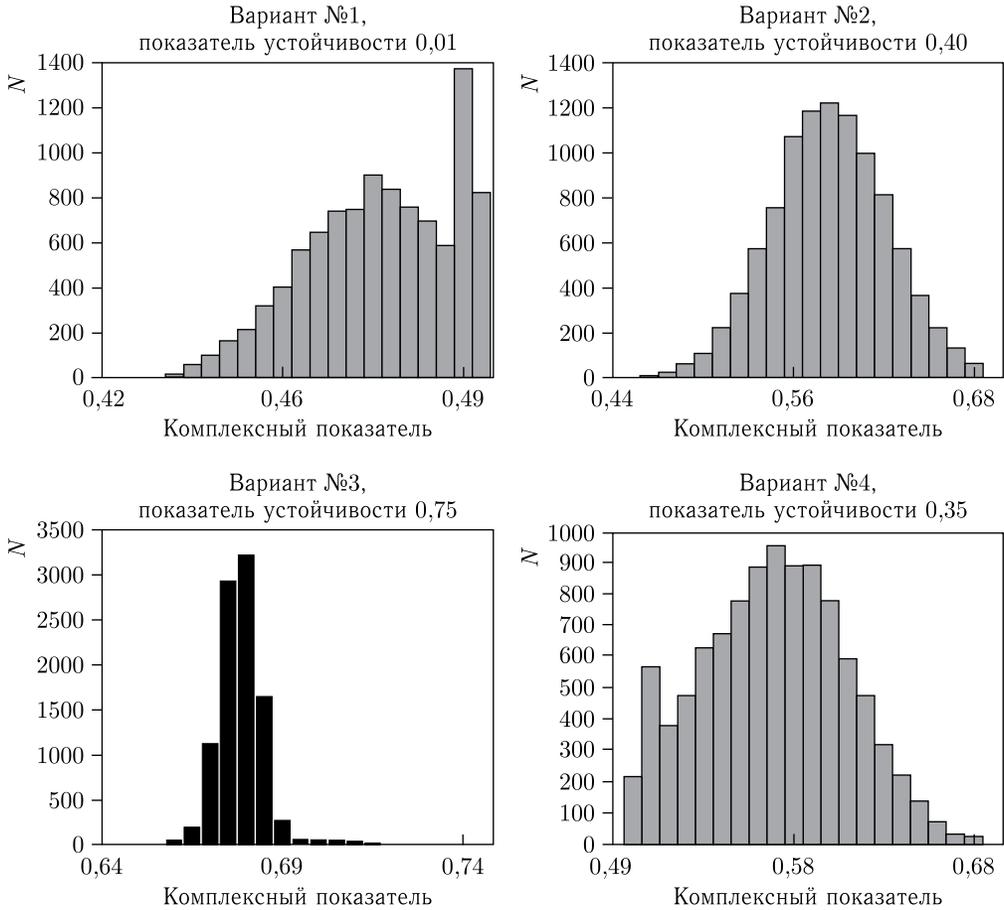


Рис. 3. Гистограммы распределения комплексного показателя

Вычисляем показатель устойчивости:

$$St_{i^*} = \frac{nN - n_i^+}{nN - n}. \quad (9)$$

Показатель устойчивости оптимального варианта ВЭ с номером i^* равен 1, если этот вариант абсолютно устойчив. Чем больше St_{i^*} (чем ближе к 1) для варианта ВЭ с номером i^* , тем устойчивее этот оптимальный вариант.

На рис. 3 представлены гистограммы распределений комплексного показателя, рассчитанных по схеме Монте-Карло, при ВЭ одного из ОИАЭ.

Из сравнений представленных гистограмм следует, что оптимальным вариантом ВЭ ОИАЭ является вариант под номером 3.

3. ФОРМИРОВАНИЕ СЦЕНАРИЕВ ПО ВЭ

Сценарий ВЭ ОИАЭ может быть описан как совокупность процессов (под процессом понимается выполнение определенной технологической операции с заданными характеристиками на определенном элементе объекта) с учетом их взаимного влияния друг на друга. Сформированный сценарий, т.е. последовательность процессов, можно представить в виде графика, как на рис. 4.

Показатели процесса ВЭ зависят от характеристик выбранных технологических операций (стоимость операции, время проведения операции, необходимое и максимально возможное количество привлекаемых специалистов для реализации операции и количество расходуемых материалов и средств) и от характеристик выводимого из эксплуатации элемента (в том числе такого, как степень загрязнения).

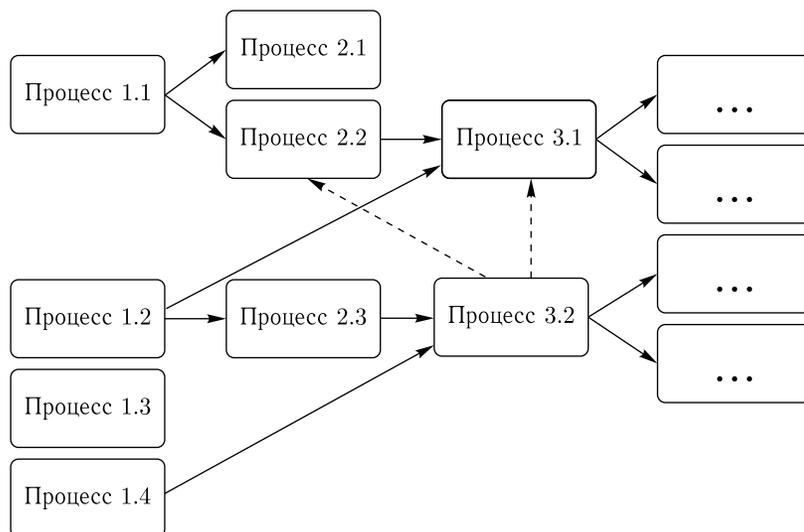


Рис. 4. Сетевой график сценария. Простыми стрелками обозначена последовательность процессов. Стрелками со штрихом обозначены возможные направленности влияния процессов друг на друга

Для каждого процесса создается список «предшествующих процессов», которые должны быть завершены, прежде чем можно будет приступить к выполнению данного процесса. По мере выполнения ВЭ указатели на завершённые процессы удаляются из списков «предшествующих операций». Если такой список оказывается пустым, то для системы это означает, что выполнены все подготовительные работы.

Также учитывается возможное влияние некоторых незавершённых процессов на другие. Например, до завершения процесса по деактивации помещения, процессы, связанные с проведением операций внутри этого помещения, будут обсчитываться с учетом получения работниками дополнительной дозовой нагрузки.

Далее дополнительно ставится ограничение по использованию нерасходуемых уникальных инструментов и средств: если в двух различных технологических операциях по плану используется одно оборудование, то данные работы не могут выполняться одновременно. Аналогичное ограничение может быть задано и по персоналу. Проведение работ параллельно позволяет сокращать время выполнения всего решения, но может вести к увеличению финансовых затрат на приобретение и эксплуатацию дополнительных экземпляров задействованного оборудования.

Таким образом, изменением количества доступного оборудования, привлеченного персонала (в том числе уникальных специалистов) и состава или последовательности технологических операций из одного решения формируется набор альтернативных решений с разными итоговыми значениями показателей стоимости, длительности и дозовых нагрузок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований разработано математическое обеспечение, реализованное в виде комплекса программных средств СППОР, предназначенное для информационной поддержки принятия управленческих решений при осуществлении деятельности по подготовке к ВЭ и ВЭ ОИАЭ. В состав комплекса входят:

- база данных, содержащая библиотеки моделей типовых элементов ОИАЭ и типовых технологических операций, осуществляемых при ВЭ;
- инструментальные средства моделирования ОИАЭ и процессов ВЭ, формирование возможных решений по ВЭ;
- программные модули, обеспечивающие оценку и сопоставление возможных решений по ВЭ и обоснованный выбор из них оптимального решения с учетом неопределенности исходных данных об ОИАЭ, а также предпочтений лица, принимающего решение.

Разработанная система обеспечивает поддержку принятия управленческих решений по планированию, подготовке и ВЭ на всех стадиях полного жизненного цикла ОИАЭ, оптимизированных по затратам финансовых, материально-технических, временных ресурсов и при условии соблюдения норм и требований ядерной и радиационной безопасности.

В настоящее время проводятся работы по внедрению разработанной системы в практику деятельности предприятий атомной отрасли.

Перспективными направлениями дальнейшего развития СППОР являются работы:

— по увеличению номенклатуры моделей типовых элементов ОИАЭ, хранящихся в БД СППОР, для верификации СППОР и расширения области ее применимости к ОИАЭ различных категорий;

— по разработке дополнительного программного модуля СППОР, реализующего алгоритм автоматизированного поиска и построения оптимального варианта ВЭ ОИАЭ. Такой модуль также может быть использован для решения задачи оценки эффективности выбранного решения.

Авторы благодарят сотрудника ЛИТ ОИЯИ Яна Буша за предварительный просмотр текста настоящей работы и сделанные конструктивные замечания, учет которых позволил улучшить ее содержание.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Costs of Decommissioning Nuclear Power Plants. IAEA, 2016.
2. Financing the Decommissioning of Nuclear Facilities. IAEA, 2016.
3. *Laraia M.* Advances and Innovations in Nuclear Decommissioning. Woodhead Publ. Ltd., 2017.
4. Рекомендации по обоснованию выбора варианта вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии. Утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 29 декабря 2018 г. № 666. 2018. 22 с.
5. Trends in Applied Intelligent Systems // Proc. of the 23rd Intern. Conf. on Industrial Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems, IEA/AIE 2010, Cordoba, Spain, June 1–4, 2010. Part I. P. 672.
6. *Bochkarev V. V., Kryanev A. V., Smirnov D. S.* Mathematical Decision Support Model for the Decommissioning of Nuclear Power Facilities // Proc. of the 10th Intern. Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). Moscow, November 5–9, 2018. P. 453–458.
7. *Абакумова А. С., Бочкарёв В. В., Иванов В. В., Крянев А. В.* Анализ устойчивости выбора варианта вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии // Письма в ЭЧАЯ. 2019. Т. 16, № 1(220). С. 76–83.
8. *Abakumova A. S., Bochkarev V. V., Ivanov V. V., Kryanev A. V.* Analysis of the Stability of Choosing the Decommissioning Option for Objects of Atomic Energy Use // Phys. Part. Nucl. Lett. 2019. V. 16, No. 1. P. 70–74.
9. *Бочкарев В. В., Бриллиантов Б. Д., Крянев А. В., Бацулин А. А., Климанов С. Г., Литвиненко О. Ю., Мамай Д. В., Слива Д. Е., Смирнов Д. С., Стряпушкин П. А., Терешкин В. И., Ханбикова Д. Т.* Структура системы поддержки принятия оптимальных решений при выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии // Вестн. НИЯУ МИФИ. 2020. Т. 9, № 4.
10. *Крянев А. В., Бочкарев В. В., Бриллиантов Б. Д.* Выбор и устойчивость оптимального варианта технологического процесса при выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии в условиях неопределенности исходных данных // Там же. № 5. С. 470–474.
11. *Крянев А. В., Бочкарев В. В., Бриллиантов Б. Д., Климанов С. Г.* Выбор и анализ устойчивости оптимального варианта ВЭ ОИАЭ в условиях неопределенности исходных данных с помощью схемы Монте-Карло // Там же. № 6. С. 538–542.

12. Бочкарев В. В., Бриллиантов Б. Д., Крянев А. В. Применение математических методов при выборе оптимального варианта обращения с РАО // Ядерная и радиационная безопасность. 2020. Т. 98, вып. 4; doi: 10.26277/SECNRS.2020.98.4.004.
13. Бочкарев В. В., Бриллиантов Б. Д., Климанов С. Г., Крянев А. В., Смирнов Д. С. Обоснование оптимальных технических и организационных решений при выводе из эксплуатации ОИАЭ с учетом обеспечения ЯРБ // Третья междунар. научно-практ. конф. «Охрана окружающей среды и обращение с радиоактивными отходами научно-промышленных центров», ФГУП «РАДОН», Москва, 22–23 сент. 2021 г.; Радиоактивные отходы. 2021. Т. 4, № 16.
14. Batsulin A. A., Bochkarev V. V., Brilliantov B. D., Klimanov S. G., Litvinenko O. Yu., Mamai D. V., Sliva D. E., Smirnov D. S., Smirnov S. A., Stryapushkin P. A., Tereshkin V. I., Khanbikova D. T. The Structure of the Support System for Making Optimal Decisions during the Decommissioning of Nuclear Facilities // Intern. J. Nucl. Gov. Econ. Ecol. 2021. V. 5, No. 1. P. 46–56; doi: 10.1504/ijngee.2021.116295.
15. Saaty T. L. Decision Making for Leaders: The Analytic Hierarchy Process for Decisions in a Complex World. Pittsburgh, Pennsylvania: RWS Publ., 2008.

Получено 27 июня 2022 г.