

On the probabilistic approach development and application for safety analyses of the Near Surface Radioactive Waste Storage during the period after its closure

N. Harbachova, N. Kulich, N. Kuzmina, S. Yatsko, J. Korchova
“Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny”
National Academy of Sciences
Acad. Krasin str. 99 Minsk, BELARUS

An improved approach for the IAEA's Safety Assessment Methodology for Near Surface Disposal Facilities (NSDF) is suggested by the authors, which is based on a probabilistic assessment of the full set of evolution's scenarios after the facility closure.

A conceptual reliability model of NSDF consisting of the matrix of the radioactive waste (RW), the repository (an engineering construction) and geological structure is represented by the fault tree of the system.

The computer program Proba_3 was developed to calculate the failure probabilities of the RW matrix, elements of repository constructions and the system as a whole for each evolution scenario. Based on the results of the analysis, a system was identified that is most sensitive to degradation processes during long-term storage of radioactive waste.

Введение. Безопасность системы хранения/захоронения радиоактивных отходов (далее – РАО) обеспечивается как техническими устройствами (системой инженерных барьеров), так и природными условиями размещения площадки для захоронения РАО (вмещающей геологической средой). Главной проблемой безопасности приповерхностных пунктов захоронения РАО (далее – ПЗРО) на этапе после закрытия является потенциальная возможность радиоактивного облучения и воздействия на окружающую среду через в отдаленном будущем.

Целью оценок долговременной безопасности ПЗРО на этапе после закрытия скорее является получение обоснованных гарантий того, что система захоронения обеспечит достаточный уровень безопасности, нежели предсказание ее какого-то определенного поведения в будущем [1].

В большинстве случаев, при оценке безопасности ПЗРО анализируется состояние одного или нескольких защитных барьеров или возможность миграции радионуклидов в окружающую среду. При этом определяют или только негативное воздействие объекта на окружающую среду, или деградацию защитных барьеров под влиянием природных факторов. Комплексному взаимодействию радиационно-опасного объекта и окружающей среды, когда в эволюцию системы могут вмешаться внешние опасные факторы, не уделяется должного внимания. Именно трудности, связанные с прогнозированием поведения площадки и хранилища на периоды времени порядка сотен или даже тысяч лет, отличают оценки безопасности этапа после закрытия от оценок эксплуатационной безопасности. что и вызывают необходимость привлечения вероятностных методов прогнозирования сценариев эволюции этой сложной системы.

Принимая во внимание имеющие место разнообразные аспекты неопределенности в понимании функционирования ПЗРО, актуальной задачей для принятия решения о безопасности, либо о необходимости извлечения РАО, консервации либо сооружении дополнительных барьеров ПЗРО является разработка вероятностных методов прогнозирования и создание математических моделей, описывающих поведение ПЗРО в условиях деградации защитных инженерных и естественных барьеров на весь период после изоляции объекта.

В настоящей работе выполнено развитие сценарного методического подхода ISAM МАГАТЭ [2] к оценке безопасности функционирования ПЗРО после изоляции системы.

*E-mail: harbachova.nv@gmail.com

Для выполнения вероятностного анализа авторами разработана концептуальная модель структуры технической системы ПЗРО, состоящей из совокупности инженерных и естественного барьеров, функция которой состоит в ограничении выноса радиоактивных загрязнений и защиту окружающей среды и населения от неблагоприятного воздействия объекта. На основе данной структурной модели разработана логико-вероятностная модель функционирования системы.

Вероятностный подход к анализу полного набора сценариев эволюции системы ПЗРО в условиях деградации

Предлагаемый подход, в отличие от методологии ISAM, в рамках которой выполняется анализ постулированного нормального сценария эволюции системы, осуществляет разработку и вероятностный анализ полного набора возможных сценариев эволюции системы с оценкой вероятности развития каждого сценария в условиях деградации систем на этапе после закрытия объекта. В основе предлагаемого методического подхода лежит системный подход к прогнозированию эксплуатационных свойств надежности и безопасности ПЗРО, функционирование которого протекает как единая взаимосвязанная сложная система, включающая [3,8,9]:

- источники возможного загрязнения – упаковки РАО (матрицы отходов, контейнеры, закрытые радионуклидные источники и т.д.) и инженерные барьеры хранилища;
- ближнюю зону хранилища – вмещающие или подстилающие естественные породы, непосредственно контактирующие с хранилищем;
- дальнюю зону хранилища (геосферу) – вмещающие породы, контактирующие с ближней зоной и биосферой, состояние и характеристики которой влияют на миграцию радиоактивных веществ от границы ближней зоны к границе биосферы;
- биосферу – окружающую среду, которая может подвергнуться воздействию в случае просачивания атмосферной влаги или подтопления грунтовыми водами с выносом радионуклидов из приповерхностного хранилища.

На данном этапе исследований будем представлять систему ПЗРО состоящую из функционально взаимосвязанных между собой трех основных подсистем (рисунок 1):

Система 1 – матрица с иммобилизованными в ней РАО, размещенная в металлической бочке, которая, в свою очередь, размещена в железобетонном контейнере (упаковка РАО [9]). Функции системы 1 – препятствовать выщелачиванию радионуклидов и миграции их из объема матрицы с потоками влаги, которая обеспечивается физико-механическими критериями матрицы и упаковки.

Система 2 – инженерно-строительный комплекс ПЗРО (хранилище РАО), конструкции которого выполняют защитные функции на пути миграции радионуклидов из хранилища в окружающую среду, а также защиту матрицы РАО от проникновения в хранилище атмосферной влаги или грунтовых вод.

Система 3 – геологическая среда, в которой размещено хранилище РАО (естественный барьер), предназначенная для ограничения миграции радионуклидов в окружающую среду

Далее каждая из трех систем раскладывается на элементы, причем рассматриваются лишь те элементы, отказ которых может влиять на работу конкретной системы. Учитывая, что состояние каждого элемента, каждой системы описывается бинарным соотношением отказ – работа, множество всех цепочек событий, которые могут привести к нежелательному аварийному событию, определяется числом $M=2^N$, где N – число подсистем; M – число сценариев.

Вероятностный подход к анализу полного набора сценариев эволюции во времени системы ПЗРО основан на построении дерева аварийных событий и деревьев отказов для системы ПЗРО. Дерево аварийных событий в нашем случае – это совокупность всех последовательностей событий с вариантами совместных отказов элементов и образующих систем (сценариев), результатом реализации которых может быть аварийный выброс ра-

дионуклидов в окружающую среду. Логическая схема развития каждого из всего множества сценариев изображена на рисунке 1.

Множество всех сценариев обладает свойством полноты и сумма вероятностей их равна единице. Для оценки безопасности системы ПЗРО вероятностными методами потребуется знание вероятности реализации каждого сценария и вероятности самой аварии. Очевидно, что сценарий 8 можно исключить из анализа, поскольку он соответствует безаварийной работе и заведомо не может привести к неблагоприятному исходу. Все остальные сценарии необходимо исследовать и проводить анализ в полном пространстве возможных состояний системы методами вероятностного анализа, используя процедуры анализа чувствительности, значимости, неопределенности.

Необходимо отметить, что вероятности реализации сценариев в ходе эволюции системы связаны с количественными и качественными изменениями характеристик надежности элементов системы в условиях деградации в период после закрытия объекта. Однако эмпирические данные по отказам элементов, опираясь на которые можно было бы делать выводы или принимать решение, имеют малую статистику. Для разработки математических моделей надежности элементов, отдельных систем в структуре инженерных барьеров ПЗРО использованы принципы разработки физико-статистических моделей надежности технических систем (методы параметрической надежности) [5]. С течением времени идет изменение параметров вследствие процессов деградации, причем изменения необратимые, с выходом параметров за допустимые границы, приводят к потере работоспособности, т.е. к отказу. Процесс изменения параметров работоспособности во времени под воздействием внешних факторов и естественных процессов деградации, как и момент выхода параметра за границы допустимых значений носит случайный характер. Таким образом, задача оценки параметрической надежности состоит в нахождении плотности распределения времени выхода параметров работоспособности элемента анализируемой системы за границы допустимой области. Для каждого элемента на основе предложенной модели получены функции распределения вероятности данного параметра, а также среднее значения, медианы и другие оценки данного параметра. Для таких характеристик, как сорбция, гидравлическая проводимость, активная пористость, на основании базы измеренных данных находят аппроксимации эмпирических функций распределения теоретическими законами. Разработанные для этих целей вероятностные модели надежности элементов Системы 1 и их компьютерные реализации описаны в [6].

Для поиска вероятностей отказов систем используем методы построения дерева отказов для каждой из систем, представляющего собой логическую цепочку событий отказов элементов, соединенных логическими символами «И», «ИЛИ». При анализе систем важнейшим фактором является причина, по которой происходит отказ. К примеру, отказ по причине старения и отказ, являющийся следствием проникновения влаги в хранилище, по-разному определяют ожидаемое среднее время жизни большинства элементов систем. И в первом, и во втором случаях времена жизни случайны, но нет оснований предполагать, что законы их распределений одинаковы. Представляется очевидным ожидание того, что во втором случае функция опасности будет расти во времени быстрее, чем в первом. Поскольку сумма вероятностей двух противоположных случайных состояний, рабочего состояния и отказа, равна единице, то знание вероятности одного из них достаточно.

Систему 1 предлагается представить состоящей из четырех элементов: элемент 1 – матрица с РАО (источник радионуклидов), элемент 2 – упаковка, содержащая металлическую бочку (элемент 3), – железобетонный контейнер (элемент 4). Система в такой конфигурации будет находиться в состоянии отказа, если будут находиться в состоянии отказа Элемент 1 или Элемент 2. В нашем случае отказ Элемента 1 – это выход радионуклидов из матрицы за счет процессов диффузии. Отказ Элемента 2 – это неспособность упаковки РАО выполнить защитную функцию в результате процессов деградации.

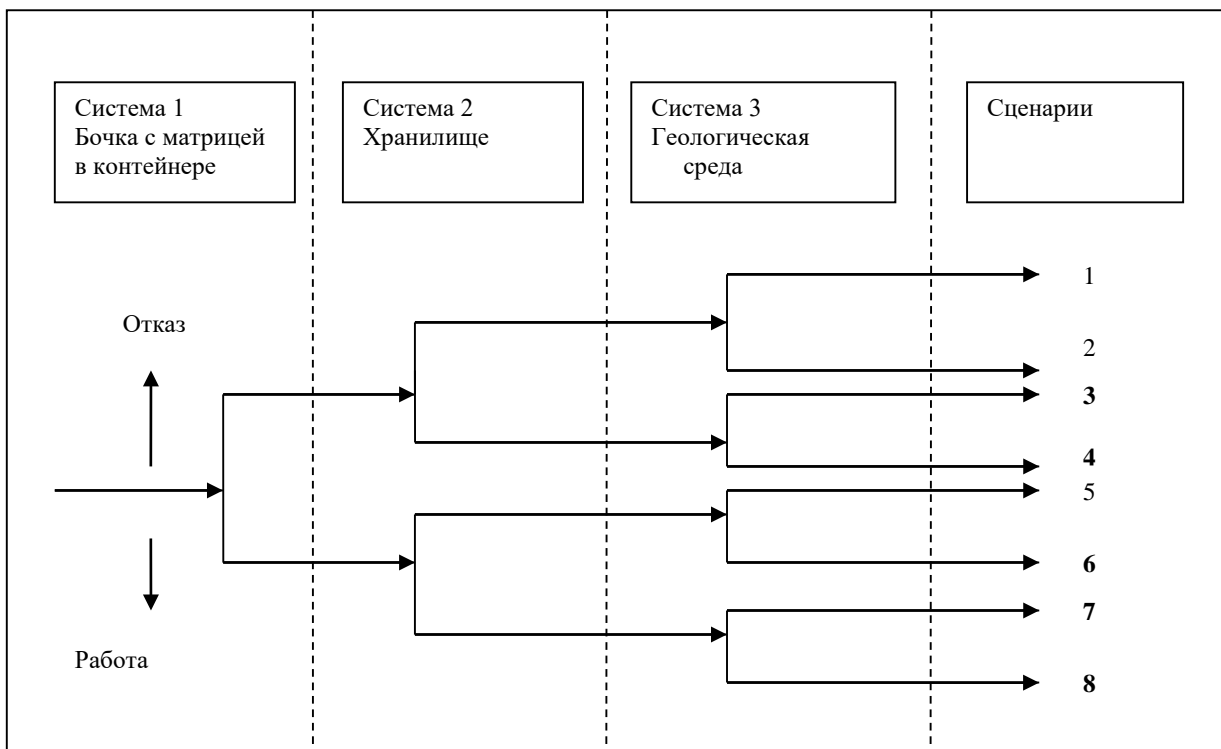


Рисунок 1 – Дерево аварийных событий для функционирующего хранилища РАО, состоящего из трех подсистем

. Количественную оценку времени деградации упаковки РАО предлагается охарактеризовать временем выщелачивания радионуклидов за границу упаковки РАО.

В качестве критериев отказа упаковки РАО, в зависимости от используемой диффузионной модели, принято монофакторное непревышение радионуклидом в поровых водах заданной доли вышедшей активности, при которой матрица считается разрушенной (наступает отказ матрицы), или нормативно установленной величины уровня вмешательства в соответствии с [4]. При расчете времени жизни упаковок РАО вследствие диффузии рассчитывается время, при котором отношение активности радионуклида, вышедшего за пределы упаковки, к начальному значению превышает заданный критерий для моделей с конечными формами отходов. Если упаковка РАО – контейнер с отходами, то можно применить модель диффузии через стенку конечной толщины (стенку контейнера) в полубесконечное пространство (вмещающую породу).

Элемент 1 и Элемент 2 можно считать неконтролируемыми и невосстанавливаемыми, и вероятности их отказов следует определять расчетным путем, применяя формулы, в которых параметрами являются временные характеристики процессов диффузии и выщелачивания, которые предстоит найти.

Согласно физической интерпретации отказов этих элементов необходимо, используя подходящие модели, найти интервалы возможных времен отказов элементов:

– для Элемента 1 – интервал для возможного времени выхода радионуклида за границу матрицы за счет процесса диффузии;

– для Элемента 2 – интервал для возможного времени выхода радионуклида за границу упаковки РАО за счет процесса выщелачивания.

Дерево отказов элементов Системы 1 показано на рисунке 2.

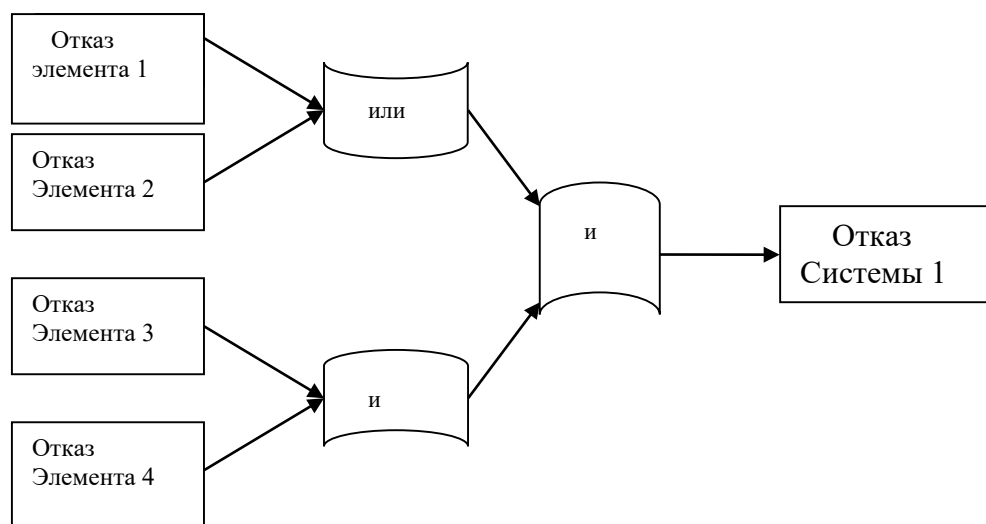


Рисунок 2 – Дерево отказов элементов Системы 1

Система 2 – это инженерно-техническое сооружение (хранилище), элементами которого могут быть стены, перекрытия, основания, глиняные замки, гидроизоляция и другие строительные элементы, защитная задача которых состоит в предотвращении выхода радионуклидов за пределы сооружения. Система 2 состоит из элементов перекрытия, в качестве которых рассмотрены (1 – бетонная плита; 2 – шов; 3 – гидроизоляция), элементов ячейки (4 – гидроизоляция стенок; 5 – бетонная плита; 6 – шов; 7 – гидроизоляция; 8 – глиняный замок), элементов основания (9 – бетонная плита; 10 – шов; 11 – гидроизоляция). Событие отказа Системы 2 наступает тогда, когда происходит определенная совокупность отказов отдельных элементов конструкции хранилища.

Физическим представлением отказа ПЗРО является выход радионуклидов за его пределы в результате нарушения целостности конструкции. Это может произойти в результате деградации поверхностного покрытия, образования трещин в перекрытиях вследствие воздействия влаги и промерзания, разрушения швов между стенками, бетонного основания хранилища и т.д.

Дерево отказов элементов Системы 2 показано на рисунке 3.

Система 3 – совокупность элементов, препятствующих горизонтальной миграции радионуклидов в направлении границы санитарно-защитной зоны, и вертикальной миграции в направлении водоносного горизонта. Отказ Системы 3 наступит в случае выхода радионуклидов за границу санитарно-защитной зоны (Элемент 1), либо попадания в водоносный горизонт в результате миграции через зону аэрации (Элемент 2). Границами геологической среды, препятствующей миграции, считаются размеры санитарно-защитной зоны и глубина зоны аэрации. Отсюда следует, что упомянутые элементы, составляющие Систему 3, соединены по схеме «ИЛИ», т.е. отказ любого из них приводит к отказу всей системы. Дерево отказов Системы 3 представлено на рисунке 4.

Физическое представление отказа Элемента 3 – это горизонтальная миграция радионуклида за пределы санитарно – защитной зоны. Отказы Элементов 2, 3, 4 – это миграция радионуклида в водоносный горизонт через условно предполагаемые слои грунтов зоны аэрации. Показателем надежности отдельного элемента или отдельной системы является вероятность того, что элемент или система не выполнят функции, заданные проектом на протяжении определенного промежутка времени, начиная с произвольного момента времени эксплуатации.

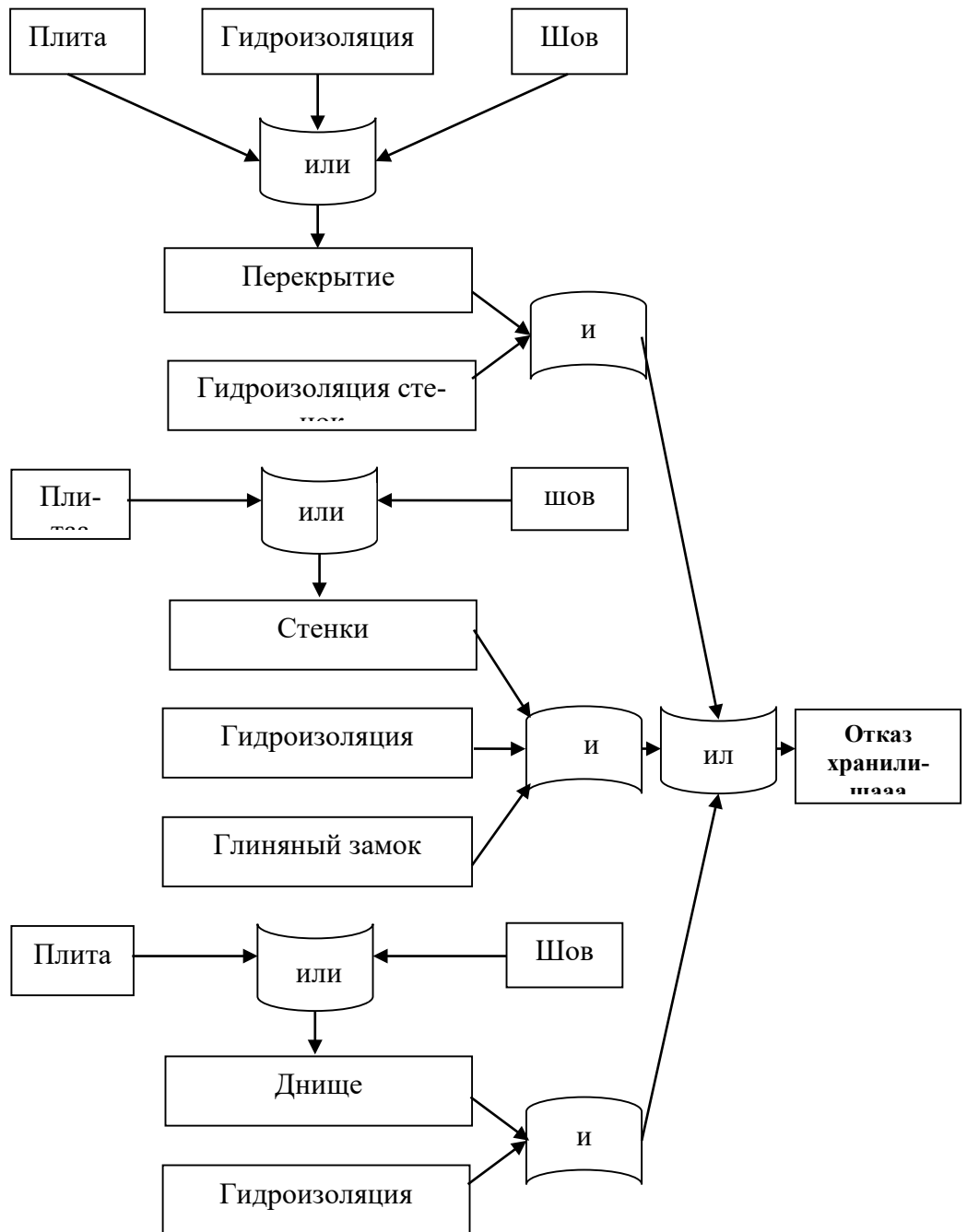


Рисунок 3 – Дерево отказов Системы 2

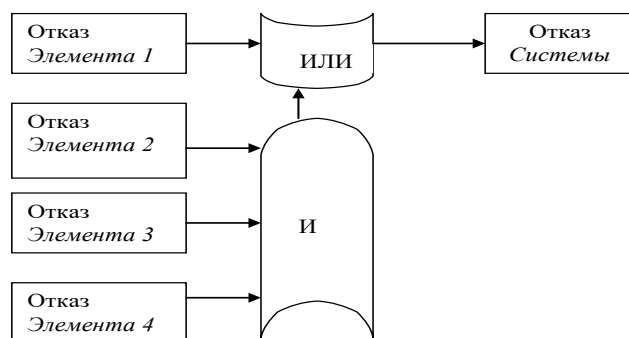


Рисунок 4 – Дерево отказов Системы 3

Необходимыми параметрами для расчета наиболее часто встречающихся типов отказов являются:

- интенсивность отказов, которая представляет собой величину, обратную среднему времени наработки на отказ;
- время от начала эксплуатации объекта; если элемент может быть восстановлен, то необходимо знать интенсивность восстановления или замены (величина, обратная среднему времени восстановления или замены);
- в случае периодического контроля элемента, необходимо знать время контроля и вероятность отказа из-за проведения контроля.

Вероятностные модели надежности Систем 1– 3 ПЗРО, обеспечивающие расчет плотности распределения времени транзита радионуклидов до границы защитного барьера и оценку вероятности отказов, интегрированы в разработанную логико-вероятностную модель ПЗРО.

На основе логико-вероятностной модели проведена адаптация программного комплекса Proba_3 для расчета вероятностей отказов элементов, отдельных систем хранилища РАО и системы в целом для использования в качестве инструмента оценки вероятностей сценариев, описывающих варианты эволюции системы хранения/захоронения РАО и выполнен вероятностный расчет времени отказа тестовой системы элементов ПЗРО.

Ниже представлены исходные данные по элементам системы ПЗРО, использованные при расчете.

Концентрация радионуклида ^{90}Sr принималась равной $1 \cdot 10^{10}$ Бк/м³. Активность равномерно распределена по объему матрицы.

Элементы Системы 1: металлическая бочка вместимостью 200-л из углеродистой стали, толщина стенок – 0,003 м, процесс деградации металлической бочки – коррозия, материал матрицы – цемент, процесс деградации матрицы – выщелачивание радионуклидов и компонентов цементной матрицы, железобетонный контейнер для РАО НЗК-150-1,5П, толщина стенок 0,15 м, материал засыпки – цемент, процесс деградации бетонного контейнера – выщелачивание.

Элементы Системы 2: вероятности отказов получены на основании данных по интенсивностям отказов элементов перекрытия (бетонная плита – $0,02 \text{ год}^{-1}$, шов между плитами – $0,07 \text{ год}^{-1}$, гидроизоляция перекрытия $0,02 \text{ год}^{-1}$), элементов основания (бетонная плита – $0,007 \text{ год}^{-1}$, шов между плитами – $0,02 \text{ год}^{-1}$, гидроизоляция основания $0,02 \text{ год}^{-1}$), элементов ячейки (бетонная плита стенок – $0,02 \text{ год}^{-1}$, шов между плитами – $0,07 \text{ год}^{-1}$, гидроизоляция стенок $0,02 \text{ год}^{-1}$, глиняный замок $0,21 \text{ год}^{-1}$).

Система 3 – зона аэрации (естественный барьер) в тестовых расчетах представлена неомогенным слоем супеси и песка мощностью 12 м. В качестве исходных данных для оценки вероятности отказа Системы 3 использованы результаты оценки интервала времени жизни естественного барьера для конкурентной площадки № 2 для размещения ПЗРО

Белорусской АЭС, полученные с помощью компьютерной программы Unsut_Kvantil в работах [6, 7]. Значения гидравлических параметров зоны аэрации и коэффициентов распределения для каждого радионуклида представлены вероятностными функциями распределения из созданной базы данных для всех типов грунтов.

На рисунке 5 приведены зависимости вероятности отказа тестового ПЗРО в случае реализации процесса по каждому из 8 сценариев на разных временных интервалах после закрытия. Идентифицированы следующие сценарии: S1(0 0 0) – Отказы трех подсистем: матрицы с РАО, хранилища и зоны аэрации; S2 (0 0 1) – Совместный отказ матрицы с РАО и хранилища РАО; S3 (0 1 0) – Отказ матрицы с РАО и зоны аэрации; S4 (0 1 1) – Отказ матрицы с РАО; S5 (1 0 0) – Совместный отказ хранилища РАО и зоны аэрации; S6 (1 0 1) – Отказ хранилища РАО; S7(1 1 0) – Отказ зоны аэрации; S8 (1 1 1) – все системы в работе.

По результатам моделирования и оценки влияния процессов деградации элементов системы захоронения после закрытия проведено их ранжирование по вкладу в вероятность отказа системы ПЗРО, представленное ниже.

На временном интервале 0 - 50 лет после закрытия ПЗРО в порядке убывания вероятности их реализации (приведены в скобках) следуют сценарии: S6 (0,62) → S 2 (0,24) → S 5 (0,05) → S 8 (0,04) → S 4 (0,025) → S 1 (0,02) → S 7 (0,01) → S3 (менее 0,001).

На временном интервале 50-300 лет после закрытия ПЗРО в порядке убывания вероятности реализации сценария: S 2 (0,54) → S 1 (0,32) → S 6 (0,08) → S 5 (0,04) → S 4 (< 0,0001) → S 7 (< 0,0001) → S 3 (< 0,0001) → S 8 (< 0,0001).

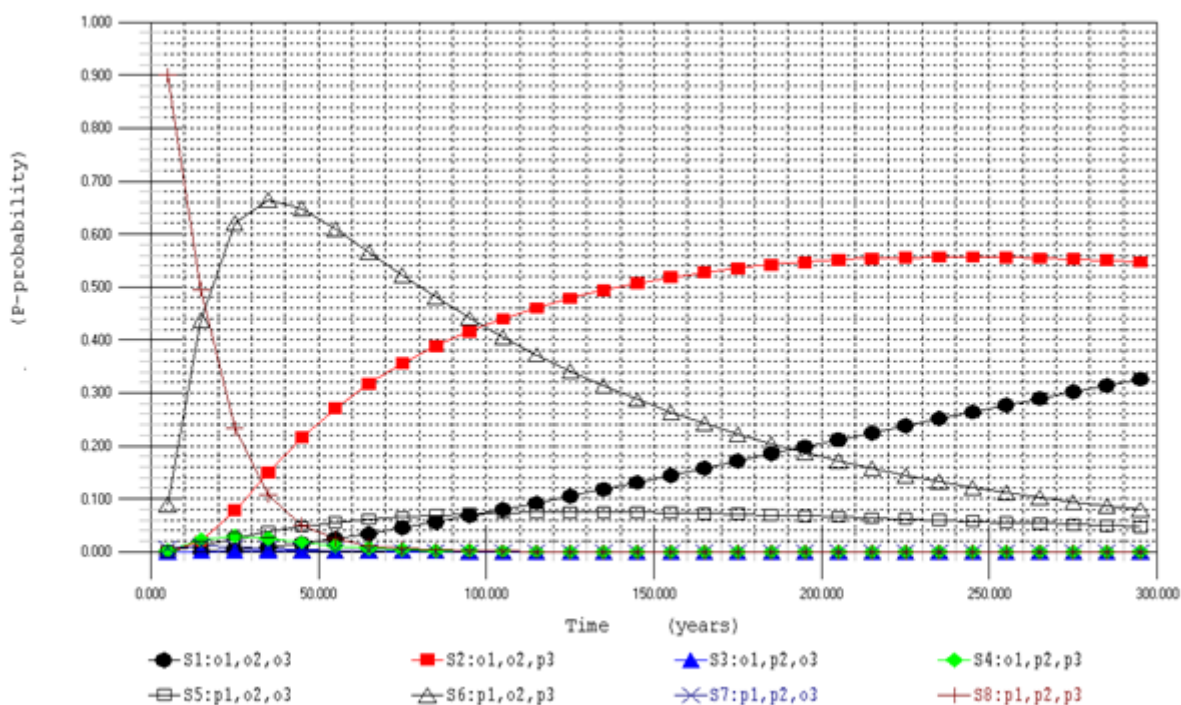


Рисунок 5 – Значения вероятностей полной системы сценариев дерева событий (S – сценарий, O – отказ, P – работа)

В таблице 1 представлены суммарные вероятности сценариев с отказом Систем 1-3.

Таблица 1– Суммарные вероятности отказа системы ПЗРО при реализации сценариев с отказами Систем 1-3

Наименование системы	Суммарные вероятности сценариев с отказом Систем 1-3	
	0 – 50 лет	50 -300 лет
Система 1. Упаковка РАО $\Sigma P(S1+S2+S3+S4)$	0,285	0,86
Система 2. Хранилище РАО $\Sigma P(S1+ S2+S5+ S6)$	0,93	0,98
Система 3. Геологическая среда (зона аэрации) $\Sigma P(S1+S3+S5+S7)$	0,08	0,36

Из результатов, представленных в таблице 1, видно, что на временном интервале 50-300 лет после изоляции объекта наибольшую вероятность вносят сценарии, связанные с отказом Системы 2 (хранилище РАО), что свидетельствует о том, что наиболее уязвимым местом ПЗРО, как сложной системы функционально взаимосвязанных между собой объектов, является инженерно-техническое сооружение. Суммарная вероятность сценариев 1,2,6,5 на момент снятия с ведомственного контроля равна 0,98, в то время как на временном интервале 0 – 50 лет суммарная вероятность этих сценариев составляет величину 0,93.

Заключение. В данной работе выполнено развитие сценарного методического подхода ISAM МАГАТЭ, обеспечивающего вероятностный долговременной безопасности ПЗРО в условиях деградации защитных барьеров на этапе после закрытия объекта. Разработана концептуальная вероятностная модель ПЗРО, представленная деревом аварийных событий для функционирующего ПЗРО. Эволюция объекта представлена полным набором из 8-ми сценариев.

Проведена адаптация программного комплекса *Proba_3* для расчета вероятностей отказов элементов, отдельных систем ПЗРО и системы хранения в целом, для использования в качестве инструмента оценки вероятностей сценариев, описывающих варианты эволюции системы хранения/захоронения РАО. Выполнен расчет вероятности тестовой системы элементов ПЗРО на разных временных интервалах от момента закрытия после изоляции объекта и показано, что на временном интервале 50-300 лет наибольший вклад в вероятность отказа системы ПЗРО вносят сценарии, связанные с отказом инженерных конструкции хранилища РАО.

Вероятностная модель и расчетный инструментарий могут быть использованы для выбора оптимальной конструкции системы хранения РАО, а также для вероятностного анализа безопасности ПЗРО с использованием методов анализа чувствительности, значимости. Структура оценки, созданная в рамках этого исследования, может быть использована при проектировании, модификации и улучшении ПЗРО путем проведения анализа результатов оценки безопасности.

Список использованных источников

1. Near surface disposal facilities for radioactive waste. Safety standards series № SSG-29. – Vienna: IAEA, 2014. – 124 p.
2. Safety Assessment Methodologies for Near–Surface Disposal Facilities. Vol. 1. – Vienna: IAEA, 2004. – 413 p.
3. Пузанов, Ю.В. Рифы безопасности / Ю.В. Пузанов. – М.: Научтехлитиздат, 2010. – 68 с
4. Санитарные нормы и правила «Требования к радиационной безопасности». Гигиенический норматив «Критерии оценки радиационного воздействия». – Минск: Минздрав РБ, 2012. – 230 с.

5. Острейковский, В.А. Сальников, Н.Д. Вероятностное прогнозирование работоспособности элементов ЯЭУ. – М.: Энергоатомиздат, 1990. –416 с.
6. Разработка обобщенной модели, алгоритмов и компьютерных программ для оценки неопределенности основных характеристик защитных барьеров хранилищ радиоактивных отходов при проведении вероятностного анализа безопасности: отчет о НИР / Объед. ин-т энергет. и ядер. исслед. – Сосны НАН Беларуси; рук. Н.В. Кулич. – Минск, 2018. – 195 с. – Инв. № 1891.
7. Ранжирование конкурентных площадок по степени влияния на защищенность и безопасность водопользования при размещении пункта захоронения радиоактивных отходов Белорусской АЭС / Н.М. Ширяева [и др.] – Минск, 2019. – 43 с. – (Препринт / НАН Беларуси Объед. ин-т энергет. и ядер. исслед. – Сосны; ОИЭЯИ-74).
8. Белоусова, А.П., Гавич, И.К. Лисенков, А.Б., Попов, Е.В. Экологическая гидрогеология: Учебник для вузов. – М.: ИЦК «Академкнига», 2006. – 397 с.
9. Веселов, Е.И. Атомная энергия, т.111. – Вып. 1, 2011. – С. 46 – 53.