

Методологические основы анализа и учета неопределённостей вероятностного анализа безопасности АЭС

Представлена классификация неопределенностей вероятностного анализа безопасности АЭС и определены их основные источники. Выполнен обзор методов статистического и аналитического анализа различных классов неопределенностей. Предложена последовательность выполнения работ по анализу и учету неопределенностей при принятии решений по безопасности АЭС.

Ключевые слова: неопределенность; вероятностный анализ безопасности (ВАБ); технический элемент ВАБ; двухфазный метод Монте-Карло.

О. М. Дибач

Методологічні основи аналізу та врахування невизначеностей імовірнісного аналізу безпеки АЕС

Подано класифікацію невизначеностей імовірнісного аналізу безпеки АЕС та визначено їх основні джерела. Виконано огляд методів статистичного та аналітичного аналізу різних класів невизначеностей. Запропоновано послідовність виконання робіт з аналізу та обліку невизначеностей у процесі прийняття рішень з безпеки АЕС.

Ключові слова: невизначеність; імовірнісний аналіз безпеки (ІАБ); технічний елемент ІАБ; двофазний метод Монте-Карло.

© А. М. Дыбач, 2014

Атомная энергетика — одна из немногих областей человеческой деятельности, в которых прогнозирование развития аварии, а также последствий принимаемых решений возможно лишь средствами моделирования. Проведение полномасштабных натурных экспериментальных исследований безопасности АЭС ограничено отсутствием специальных исследовательских стендов, сложностью и потенциальной опасностью таких экспериментов.

Использование физических и (или) математических моделей для отражения реальных процессов всегда сопряжено с неопределенностями различной природы. Получаемые с помощью расчётных методов результаты зависят от достоверности исходных данных о свойствах моделируемого объекта. Имеющиеся исходные данные, как правило, носят вероятностный характер с принятыми для теории вероятности характеристиками неопределённостей. Точность получаемых расчётным путём результатов, кроме случайных значений входных данных, зависит также от корректности физического и математического моделирования состояния объекта и происходящих в нём процессов, а также от методов расчёта в соответствии с возможностями вычислительной техники. Принимаемые допущения в силу незнания или невозможности решить задачу в более корректной постановке вносят свои неопределённости в результаты. Оценка неопределённостей получаемых результатов — задача не менее сложная, чем получение самих результатов [1, 2].

В настоящее время при оценке безопасности АЭС используется комбинация двух взаимодополняющих методов анализа безопасности — детерминистического и вероятностного [3]. Для обоих методов характерны неопределенности различной природы, требующие надлежащего рассмотрения и учета при принятии решений, влияющих на безопасность АЭС.

Неопределенности *детерминистического* анализа безопасности могут быть компенсированы при использовании консервативного подхода. В этом случае для параметров и характеристик конструкций, систем и элементов АЭС принимаются значения и пределы, заведомо приводящие к наиболее неблагоприятным результатам, в результате чего обеспечиваются запасы безопасности по отношению к нормируемым критериям приемлемости, которые огибают возможные неопределенности детерминистического анализа безопасности.

Особенностью *вероятностного* анализа безопасности (ВАБ) является использование реалистического подхода, при котором для учитываемого в вероятностной модели оборудования энергоблока АЭС применяются реальные эксплуатационные характеристики, а также дается кредит доверия противоаварийным действиям персонала.

Результаты ВАБ в значительной мере зависят от статистической базы и допущений вероятностного моделирования, что подтверждается сравнительным анализом ВАБ для энергоблоков АЭС одного проекта. На рис. 1 представлены значения частоты исходного события аварии (ИСА) с потерей питательной воды в ВАБ для АЭС с ВВЭР-440, на рис. 2 — результаты оценки данного ИСА (на основании материалов [4]).

Данные на рис. 1 и 2 свидетельствуют о большом расхождении результатов ВАБ. Например, значения условной вероятности повреждения активной зоны (CCDP) в ВАБ энергоблока № 1 Ровенской АЭС и энергоблока № 1 АЭС «Моховце» отличаются на четыре порядка, а значения частоты повреждения активной зоны (CDF) для энергоблока № 1 Ровенской АЭС и энергоблока № 4 Кольской АЭС — на три порядка. Различие в результатах можно объяснить

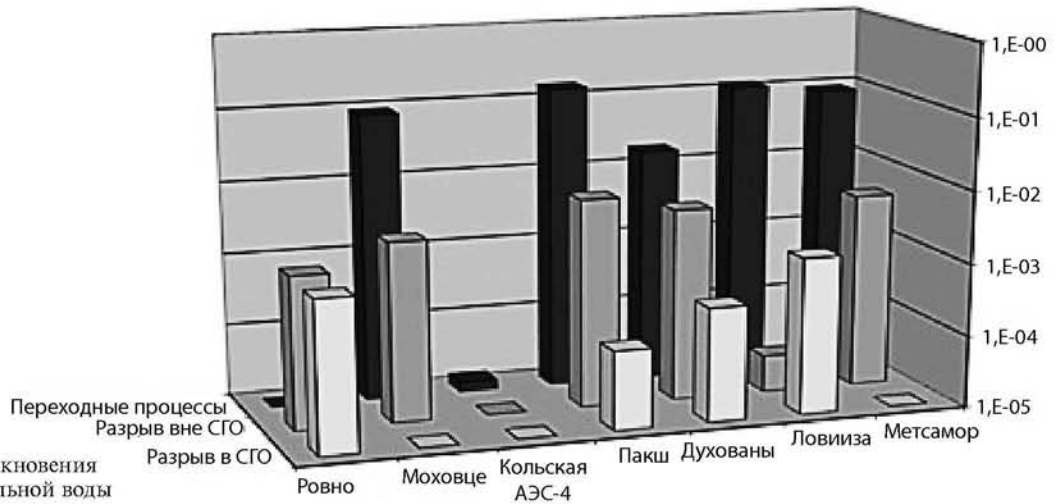


Рис. 1. Частота возникновения ИСА с потерей питательной воды

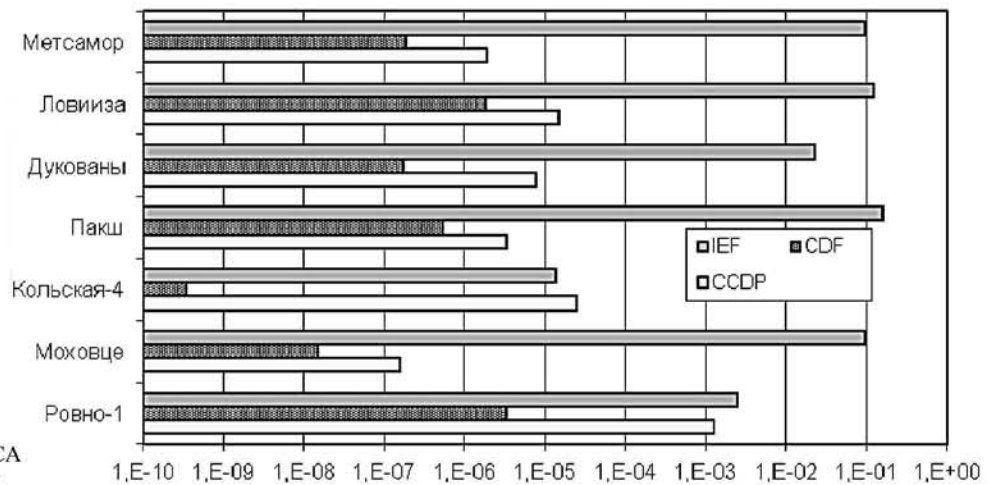


Рис. 2. Результаты анализа ИСА с потерей питательной воды

объективными причинами: специфическими особенностями проектов энергоблоков на разных площадках, перечнем реализованных мероприятий по повышению безопасности, различным опытом эксплуатации. Однако основной причиной все же являются разные исходные данные и допущения моделирования ИСА, принятые разработчиками ВАБ, например:

1) при расчете частоты ИСА с потерей питательной воды в разных ВАБ учитывался разный набор событий. Так, в ВАБ АЭС «Пакш» консервативно учтены события с отказом одного питательного насоса, что привело к максимальному значению частоты ИСА среди всех ВАБ; в ВАБ энергоблока № 1 Ровенской АЭС, в отличие от ВАБ для других АЭС, принимались во внимание только события, связанные с разрывом трубопроводов питательной воды; отказы питательных насосов при переходных процессах не рассматривались;

2) в ВАБ АЭС «Моховце» дан высокий кредит доверия действиям персонала по восстановлению теплоотвода по второму контуру (в том числе с использованием мобильных установок), что привело к самому низкому значению

условной вероятности повреждения активной зоны среди всех ВАБ;

3) в ВАБ АЭС «Метсамор», «Дукованы», «Пакш» и «Моховце» в деревьях событий смоделирована процедура «сброс—подпитка» по первому контуру. Как следствие, условная вероятность повреждения активной зоны получена ниже, чем для ВАБ, в которых возможность теплоотвода по первому контуру консервативно не рассмотрена.

Представленные отличия в результатах ВАБ обусловлены различного рода неопределенностями, связанными с достоверностью исходных статистических данных и моделированием аварийного процесса. Проблема анализа и учета неопределенностей ВАБ является ключевой при решении практических задач с учетом оценок риска [5, 6], так как уровень неопределенности напрямую влияет на степень доверия к результатам ВАБ, на обоснованность и правильность принимаемых решений.

В статье приведены общие методические основы анализа и учета неопределенностей ВАБ, требующие дальнейшего развития и разработки соответствующего математического аппарата.

Классификация неопределенностей. В большинстве современных публикаций по анализу неопределенностей (например, [7, 8]) выделяют два класса неопределенностей вероятностных оценок: алеаторную и эпистемологическую.

Алеаторная неопределенность является сущностью случайных вероятностных процессов. Также используются термины «стохастическая», «случайная», «неснижаемая» неопределенность.

Эпистемологическая неопределенность является следствием недостатка знаний и отражает степень уверенности разработчика ВАБ в достоверности модели. Также используются термины «основанная на знаниях», «субъективная», «снижаемая» неопределенность.

Графически два класса неопределенностей показаны на рис. 3, 4 на примере функции распределения плотности вероятности и кумулятивной функции распределения вероятности для параметра модели ВАБ [9].

В классе эпистемологической неопределенности следует выделить три группы:

1. Неопределенность параметров.
2. Неопределенность моделирования.
3. Неопределенность полноты модели.

Разделение эпистемологической неопределенности на группы обусловлено различием в подходах их оценки.

Неопределенность параметров — неопределенность в расчетах значений частоты исходных событий аварий, вероятности отказа компонентов и ошибок действий персонала, которые используются в вероятностной модели.

Неопределенность моделирования — неопределенность в допущениях, принятых при разработке модели и выполнении вероятностных оценок, для которых отсутствует обоснованный и общепринятый подход и известно, что они

влиять на результаты оценок (например, изменение критериев успеха, рассмотрение новых ИСА). Неопределенность моделирования возникает при недостатке знаний об объекте по следующим причинам:

- 1) феномены, которые моделируются, недостаточно изучены (например, работа пассивных систем в новых проектах);
- 2) феномены, по которым имеются данные для условий, отличаются от рассматриваемых в вероятностной модели (например, размер течи через уплотнения главного циркуляционного насоса при разных давлениях в первом контуре);
- 3) недостаточно изучены отказы элементов (например, отказы в системах управления, ложное срабатывание).

Неопределенность полноты модели — неопределенность в детализации и полноте вероятностной модели. Неопределенность полноты модели можно рассматривать как составную часть неопределенности моделирования. К особенностям неопределенности полноты модели относится то, что аспекты, которые она затрагивает, не отражены в модели (в том числе те аспекты, которые были или остаются неизвестными до выполнения оценок). Неопределенность полноты модели может возникать по следующим причинам:

- 1) в составе ВАБ не рассмотрены отдельные классы исходных событий аварий, экстремальных воздействий или режимы эксплуатации;
- 2) некоторые аспекты осознанно не учтены, так как не разработаны соответствующие методики анализа, что является потенциальным ограничением выполненных оценок (например, учет старения или влияния организационных факторов);
- 3) феномены или механизмы отказа упущены вследствие того, что их влияние не было идентифицировано или принято пренебрежимо малым.

Источники неопределенностей. Идентификация источников неопределенностей является начальным этапом анализа неопределенностей.

Для неопределенностей *параметров* характерны два основных источника:

1. Корректность математического задания неопределенности базовых событий.
2. Учет корреляции данных по надежности для однотипного оборудования при использовании в их расчете общих статистических данных (обобщенных или специфических). Эффект корреляции проявляется тогда, когда для расчета данных по надежности определенного типа оборудования (например, насосы, электроприводная арматура) используется одинаковый массив статистических данных. В этом случае на каждом шаге расчета модели такого оборудования должно быть принято одинаковое значение из заданного распределения плотности вероятности.

Можно предложить обобщенный перечень потенциальных источников неопределенностей *моделирования* для каждого технического элемента ВАБ (табл. 1). Оценка применимости данного перечня, а также его пересмотр (расширение) должны выполняться в зависимости от специфической особенности ВАБ и решаемой практической задачи.

Источники неопределенностей *полноты модели* прежде всего зависят от характера прикладной задачи, выполняемой с использованием ВАБ. Оценка применимости вероятностной модели для решения конкретной задачи позволяет выявить аспекты, которые не учтены или рассмотрены недостаточно детально.



Рис. 3. Функция распределения плотности вероятности



Рис. 4. Кумулятивная функция распределения вероятности

Таблица 1. Обобщенный перечень потенциальных источников неопределенностей моделирования

Технический элемент ВАБ	Основные составляющие технического элемента	Источник неопределенности (примеры)
Исходные события аварий (ИСА)	Идентификация исходных событий аварий	Учет редких ИСА. Влияние начальной конфигурации энергоблока. Изменение эксплуатационной практики
	Группирование исходных событий аварий	Скрининг и отсев ИСА. Выбор представительных ИСА
	Расчет частот исходных событий аварий	Применимость обобщенных данных. Достоверность предыдущего эксплуатационного опыта. Учет старения
Данные по надежности оборудования	Расчет показателей надежности базовых событий	Сбор и обработка исходных данных (в том числе числе данных по отказам, ремонту, техническому обслуживанию). Группирование оборудования. Применимость обобщенных данных. Старение и деградация оборудования
Анализ аварийных последовательностей	Моделирование развития аварийных последовательностей	Учет восстановительных действий. Кредит доверия для действий персонала, не предусмотренных инструкциями. Учет частичных отказов. Интерпретация инструкций
	Зависимости аварийных последовательностей	Функциональные зависимости. Времязависимые отказы от условий внешней среды. Времязависимые критерии успеха
Критерии успеха	Расчет критериев успеха	Неопределенности расчетных моделей (теплогидравлической/прочностной). Учет различных конфигураций оборудования. Начальные и граничные условия
Анализ систем	Виды и причины отказов	Границы компонентов. Суперкомпоненты. Учет восстановления после ремонта
	Зависимые отказы и отказы по общей причине	Работоспособность оборудования при авариях. Межблочные связи. Отказы по общей причине
Надежность персонала	Расчет вероятности ошибок персонала	Ошибки идентификации и действий. Влияние внешних факторов. Качество противоаварийной документации. Интерфейс «человек—машина»
Количественная оценка	Расчет частоты повреждения активной зоны, частоты предельного аварийного выброса	Уровень отсечения минимальных сечений. Применение корреляций для базовых событий

Иллюстрация распространения неопределенностей моделирования в вероятностной модели представлена на рис. 5 на примере дерева событий ИСА Т1 «Обесточивание всех секций нормального электроснабжения» ВАБ ВВЭР-1000/В-320 (использована независимая вероятностная модель для целей экспертных оценок [10]). Для данного ИСА можно выделить следующие источники неопределенностей моделирования ВАБ:

вероятность ошибки персонала при выполнении действий по восстановлению электроснабжения;

необоснованные интервалы для восстановительных действий персонала (например, принятое в ВАБ время разряда аккумуляторных батарей — 1 ч — консервативно по отношению к результатам испытаний — 10 ч);

недостаточное (с учетом уроков аварии на АЭС «Фукусима-Даичи») требуемое время работы систем (mission time) — 24 ч; отсутствие рассмотрения функции безопасности «ввод бора в теплоноситель первого контура» при длительном расхолаживании по второму контуру;

вероятность ошибки персонала по дозаполнению баков аварийной питательной воды.

Подводя итоги относительно неопределенностей источников неопределенностей ВАБ, следует отметить, что по результатам анализа аварии на АЭС «Фукусима-Даичи» выявлены аспекты методологии ВАБ, требующие дальнейшего усовершенствования, что, в конечном счете, также приведет к снижению неопределенности моделирования и полноты модели (детально рассмотрено в [11]).

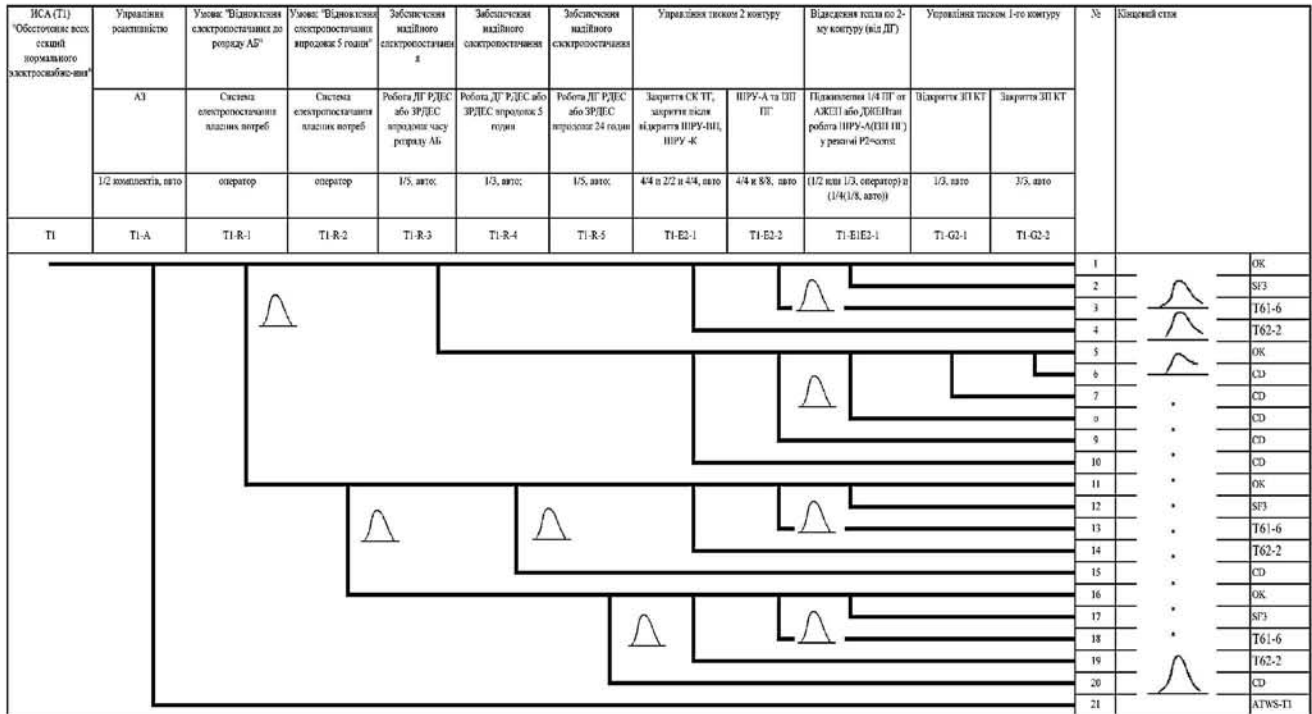


Рис. 5. Распространения неопределенностей на примере дерева событий ИСА Т1 «Обесточивание всех секций нормального электроснабжения» в ВАБ ВВЭР-1000/В-320

Методы анализа неопределенностей. Математическую модель любой физической системы можно упрощенно представить как цепочку *входные параметры* → *система* → *выходной параметр*. Проблема анализа неопределенности состоит в определении неопределенности выходного параметра Y , который является функцией от множества независимых переменных X_1, X_2, \dots, X_N :

$$Y = F\{X_1, X_2, \dots, X_N\}, \quad (1)$$

где функция F в данном случае представляет собой модель ВАБ, генерирующую перечень минимальных сечений, из которых рассчитываются ЧПА3 и ЧПАВ. Независимые переменные X_1, X_2, \dots, X_N — это параметры, на основании которых определяются вероятности базовых событий вероятностной модели (например, поток отказов оборудования, длительность ремонтов, параметры отказов по общей причине и т. д.). По результатам обработки имеющихся статистических данных, байесовской комбинации обобщенных и специфических данных, экспертной оценки для переменных X_1, X_2, \dots, X_N задается плотность распределения вероятности. При задании переменных учитываются также неопределенности, связанные с принятыми в анализе допущениями.

Анализ неопределенности может быть выполнен на качественном и (или) количественном уровне.

Метод *качественного* анализа неопределенности использовался в 1980-х годах при выполнении первых ВАБ (например, [12]). Этот метод включает идентификацию ключевых аспектов модели; идентификацию основных допущений по ключевым аспектам модели; ранжирование допущений по влиянию на модель; использование табулированных матриц для оценки неопределенности.

Современное развитие расчетных методик и кодов позволяет выполнять *количественный* анализ неопределенности с использованием различных подходов (детальный анализ методик представлен в [13]).

Количественный анализ неопределенности затрагивает следующие аспекты:

анализ чувствительности (sensitivity analysis), т. е. оценку влияния входных параметров системы, классифицированных как неопределенные, на выходные параметры модели системы;

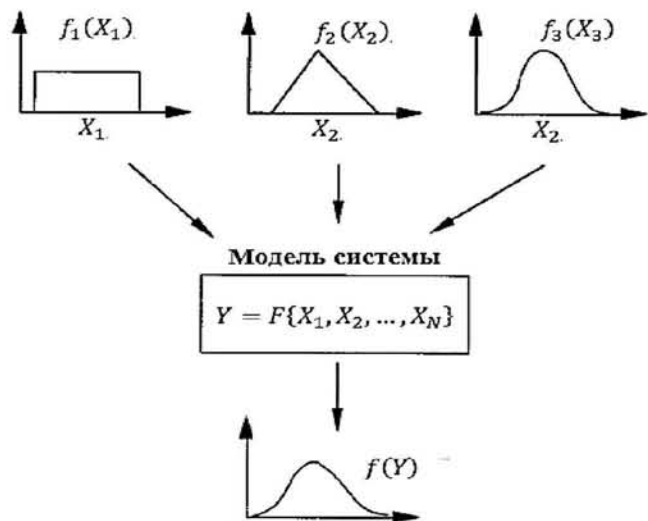


Рис. 6. Распространение неопределенности в вероятностной модели

распространение неопределенностей (uncertainty propagation), т. е. передачу неопределенностей от входов к выходам модели системы;

ранжирование по важности (importance measures), т. е. расчет относительного вклада неопределенностей во входных параметрах в суммарную неопределенность в выходных параметрах модели.

Распространение неопределенности в вероятностной модели представлено на рис. 6.

Система имеет X_1, X_2, \dots, X_N входных параметра, заданных различными функциями распределения плотности вероятности $f_1(X_1), f_2(X_2), \dots, f_N(X_N)$. Зная эту информацию, можно рассчитать плотность вероятности $f(Y)$ выходной величины $Y = F \{X_1, X_2, \dots, X_N\}$ и ее статистические параметры. Варьируя параметры плотностей вероятности f_i , т. е. рассматривая их как зону неопределенности, можно на выходе получить семейство функций плотности вероятности $f(Y)$ [8]. Недостаток метода заключается в том, что

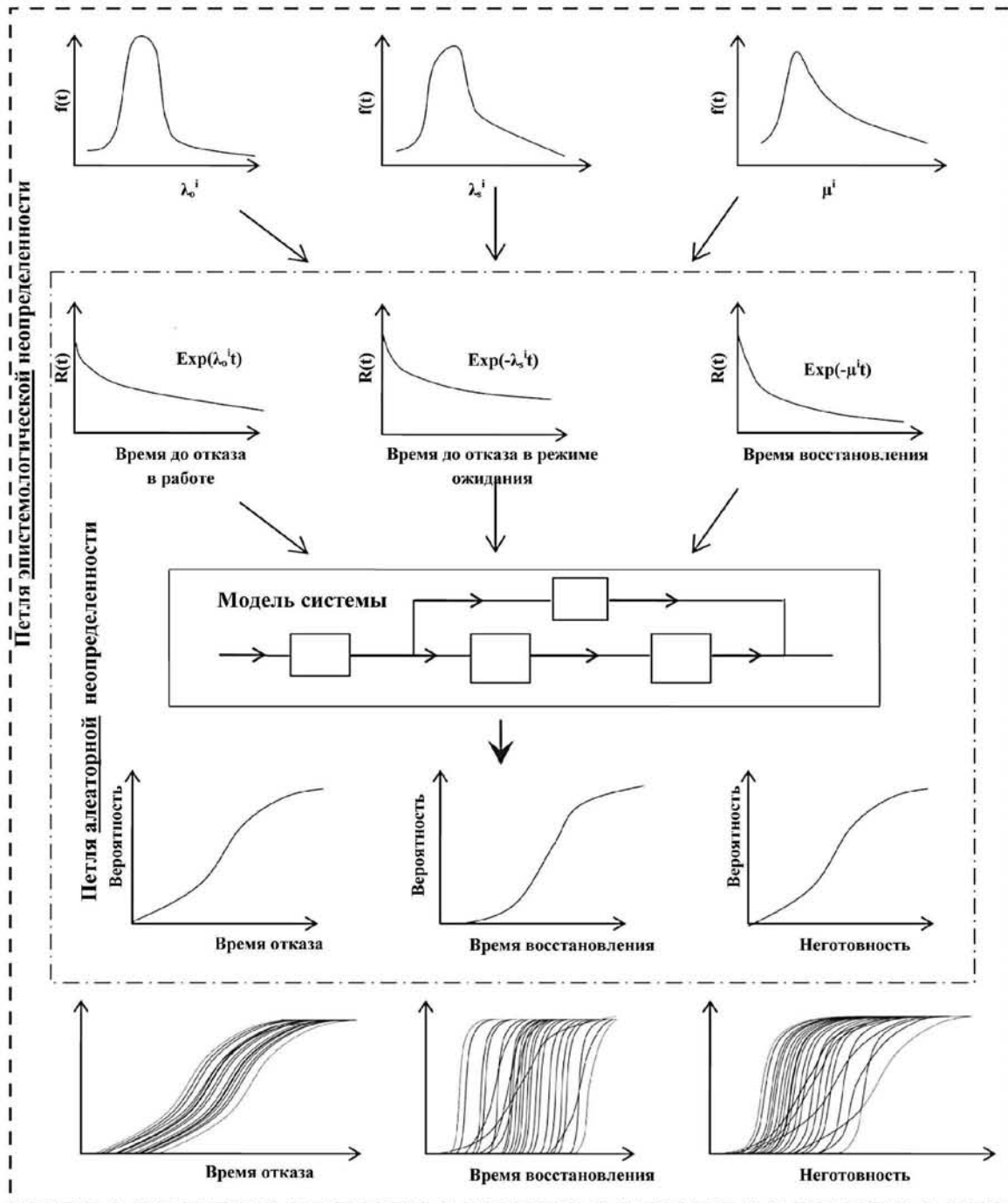


Рис. 7. Схема применения двухфазного метода Монте-Карло

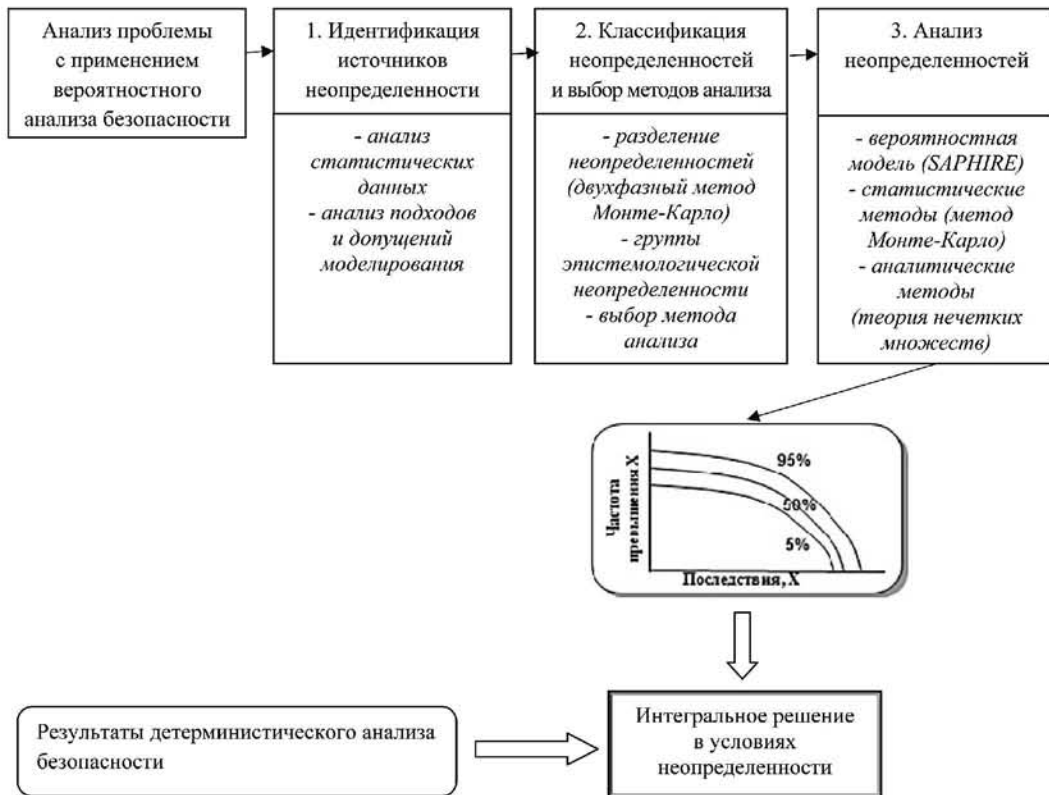


Рис. 8. Последовательность выполнения анализа и учета неопределённости ВАБ

часто отсутствует репрезентативная статистическая информация, позволяющая определить вид функций плотности распределения вероятности для последующего анализа.

Количественный анализ неопределенности ВАБ может быть выполнен с применением следующих математических методов.

1. *Методы статистического моделирования.* Это метод Монте-Карло (Monte Carlo Sampling), метод латинского гиперкуба (Latin Hypercube Sampling) и другие методы, основанные на компьютерном симулировании больших выборок случайных данных. Они одни из наиболее проработанных методов для анализа неопределенностей.

Метод Монте-Карло состоит в компьютерном моделировании неопределенных параметров системы с последующим пересчетом значения верхнего события при случайных выборках значения всех базовых событий из заданного распределения плотности вероятности базового события.

Преимущества метода: свобода выбора распределения базовых событий; возможность достижения любой точности атрибутов верхнего события (зависит от компьютерного времени расчета и ошибки округления); простота в использовании.

Недостатки метода: необходимость задания плотности распределения вероятности для всех событий; значительное компьютерное время расчета; невозможность оценить чувствительность значения верхнего события при изменении вклада неопределенности от базовых событий.

Особый интерес представляет двухфазный метод Монте-Карло, с помощью которого можно выделить алеаторную и эпистемологическую неопределенности. Пример использования двухфазного метода Монте-Карло

представлен в [15] и проиллюстрирован на рис. 7. В данном примере выполняется оценка неопределенности неготовности оборудования ВАБ, которая является функцией от двух величин: интенсивности отказа (λ) и интенсивности восстановления (μ). Внутренняя петля статистического моделирования Монте-Карло соответствует алеаторной неопределенности (случайность времени отказа и времени восстановления — экспоненциальное распределение), внешняя петля — эпистемологической неопределенности (неточность при оценке времени отказа оборудования и времени восстановления — логнормальное распределение). Для каждой итерации расчета значения параметров во внешней петле выбираются из заданного распределения случайно и передаются во внутреннюю петлю. Во внутренней петле генерируются случайные значения времени до отказа и времени восстановления, с учетом которых просчитывается логика системы. Для каждой итерации во внутренней петле строится распределение неготовности системы, которое учитывает стохастическую природу отказов и восстановления системы. Результатом заданного количества итераций является семейство кривых распределения, где каждая кривая характеризует алеаторную неопределенность, а семейство кривых — эпистемологическую неопределенность (см. также рис. 4).

2. *Аналитические методы.* Основаны на том, что в ряде случаев можно получить аналитическое представление функции отклика $Y = F \{X_1, X_2, \dots, X_N\}$ в виде фиксированных (Y_0) и неопределенных (ΔY) слагаемых в этой функции отклика:

$$Y = Y_0 + \Delta Y. \quad (2)$$

В частности, с подобной целью применяется аппроксимация при помощи разложения в ряд Тейлора. Достоинство таких методов — в простой интерпретации полученных результатов и, в некоторых случаях, достаточной точности. Недостаток — в их неприменимости при наличии существенной нелинейности функции отклика, что приводит к существенным неточностям получаемых результатов.

Также для решения задачи возможно использование нечетких множеств (Fuzzy Set). Теория нечетких множеств нашла свое прикладное применение во многих сферах, в том числе и в анализе неопределенностей [14]. В основе понятия нечеткого множества лежит представление о том, что составляющие данное множество элементы, обладающие общим свойством, могут обладать им в различной степени и, следовательно, принадлежать к данному множеству с различной степенью, называемой степенью или функцией принадлежности $\alpha(x)$, которая является числом из диапазона $[0, 1]$.

Представив все входы X_1, X_2, \dots, X_N модели $Y = F\{X_1, X_2, \dots, X_N\}$ как нечеткие числа, можно получить выход модели Y как нечеткое число. Методология не требует наличия подробной эмпирической информации, можно использовать субъективно назначенные функции принадлежности, не надо определять зависимости и корреляции между параметрами. Таким образом, нечеткие множества подходят, когда эмпирической информации очень мало. Недостаток этого подхода заключается в том, что сложно различать неопределенности разных видов.

Последовательность выполнения работ. Для решения проблемы анализа и учета неопределенностей ВАБ требуется выполнение комплекса задач, представленных на рис. 8.

В процессе принятия интегрального решения в общем случае необходимо найти ответы на два ключевых вопроса: 1) является ли уровень неопределенности вероятностных оценок приемлемым? 2) какие компенсирующие мероприятия должны быть предприняты в зависимости от уровня и природы неопределенности вероятностных оценок?

Принятие интегрального решения является отдельной задачей теории принятия решений в условиях неопределенности. В настоящее время не разработаны критерии приемлемости по отношению к уровню неопределенности вероятностных оценок. Что касается компенсации неопределенностей, в качестве мероприятий предварительно можно предложить увеличение запасов безопасности, усиление принципов резервируемости и разделения, увеличение объемов мониторинга.

Выводы

Использование физических и (или) математических методов для отражения реальных процессов всегда сопряжено с неопределенностями различной природы. Для вероятностного анализа безопасности АЭС характерны неопределенности, обусловленные недостоверностью исходных данных о свойствах моделируемого объекта и принятыми допущениями (упрощениями) при разработке расчетных моделей.

Уровень неопределенности выполненных вероятностных оценок характеризует степень доверия к полученным результатам и должен в обязательном порядке учитываться при принятии решений с учетом оценок риска.

Анализ и учет неопределенностей ВАБ является комплексной задачей, решение которой возможно

с применением методов статистического моделирования и аналитических методов. Необходимо разработать алгоритм и математические модели для оценки разных групп неопределенностей, а также критерии приемлемости по отношению к уровню неопределенностей вероятностных оценок и учету неопределенностей при принятии решений.

Список использованной литературы

1. Тихонов М. Н. После Чернобыля и Фукусимы-1: выявление и оценка неопределенностей и рисков / М. Н. Тихонов, М. И. Рылов // АНРИ. — 2014. — Вып. 2 (77). — С. 2–77.
2. Ковалевич О. М. Анализ неопределенностей при рассмотрении инфраструктурных проектов и принятия решений / О. М. Ковалевич // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. — 2013. — Вып. 4. — С. 15–21.
3. Safety Assessment for Facilities and Activities / IAEA. — 2009. — (GSR Part 4).
4. Dybach O., Pogoyan S., Jakes M., Virolainen R., Janke R., Macsuga G., Lankin M., Husarcek M., Kouzmina I. Comparison of PSA Practices and Results // VVER Forum. PSA WG. — 2009.
5. Дыбач А. М. Применение риск-информированных подходов в инспекционной деятельности / А. М. Дыбач, Г. В. Громов, А. Е. Севбо, М. Х. Гашев, В. С. Бойчук // Ядерна та радіаційна безпека. — К., 2010. — Вып. 3 (47). — С. 9–15.
6. Дыбач А. М. Концепция оперативного вероятностного анализа безопасности / А. М. Дыбач, Е. В. Калько, А. Е. Севбо // Ядерна та радіаційна безпека. — К., 2012. — Вып. 3 (55). — С. 51–56.
7. Guidance on the Treatment of Uncertainties Associated with PRAs in Risk-Informed Decision Making: U. S. Nuclear Regulatory Commission. — 2009. — (NUREG-1855, Vol. 1).
8. Abrahamsson M. Uncertainty in Quantitative Risk Analysis — Characterisation and Methods of Treatment // Lund. Report 1024. — 2002.
9. Ishigami T., Ishikawa J., Shintani K., Mayumi M., Muramatsu K. An Approach to Evaluation of Uncertainties in Level 2 PSAs // OECD/NEA/CSNI/WGRISK Workshop. — 2004.
10. Розробка імовірнісної моделі імовірнісного аналізу безпеки АЕС із ВБЕР-1000/320 1-го рівня стосовно внутрішніх ініціаторів / ДНТЦ ЯРБ. — 2010.
11. Lyubarskiy A., Kouzmina I., El-Shanawany M. Notes on potential areas for enhancement of the PSA methodology based on lessons learned from the Fukushima accident // Proceedings of the 2nd Probabilistic Safety Analysis. — 2011.
12. Limerick Generating Station Probabilistic Risk Assessment // Philadelphia Electric Company, Docket. — 1981. — P. 350–353.
13. Zio E. Risk analysis. Literature review of Methods for Representing Uncertainty. — 2013.
14. Zadeh L. Fuzzy sets. Information and Control Theory. — 1965. — P. 338–353.
15. Durga K., Kushwaha H., Vermab A., Srividya A. Quantification of epistemic and aleatory uncertainties in level-1 probabilistic safety assessment studies // Reliability Engineering & System Safety. — 2007. — P. 947–956.

References

1. Tikhonov M. N., Rylov M. I. (2014), After Chornobyl and Fukushima-1: Identification and Assessment of Uncertainties and Risks [Posle Chernobylia i Fukusimy-1: vyivleniie i otsenka neopredelionnostei i riskov], ANRI, No. 2 (77), pp. 2–77. (Rus).
2. Kovalevich O. M. (2013), Analysis of Uncertainties during Review of Infrastructure Projects and Decision Making” [Analiz neopredelionnostei pri rassmotrenii infrastrukturykh proektov i priniatii reshenii. Problemy bezopasnosti i chrezvychainykh situatsiy], Safety and Emergency Issues, No. 4, p. 15–21. (Rus).
3. Safety Assessment for Facilities and Activities, IAEA, 2009. (GSR Part 4).

4. Dybach O., Pogosyan S., Jakes M., Virolainen R., Janke R., Macsuga G., Lankin M., Husarcek M., Kouzmina I. (2009). Comparison of PSA Practices and Results, VVER Forum. PSA WG. Final Report.
5. Dybach O., Gromov G., Sevbo O., Gashev M., Boychuk V. (2010), "Application of Risk-Informed Approaches in Inspection Activity" [Primeneniie risk-informirovannykh podkhodov v inspektsionnoi deiatelnosti. Yaderna ta radiatsiina bezpeka], Nuclear and Radiation Safety, Kyiv, No. 3 (47), pp. 9–15. (Rus).
6. Dybach O., Kalko Y. Sevbo A. (2012), "Concept of Living PSA" [Kontsepsiia operativnogo veroiatnostnogo analiza bezopasnosti. Yaderna ta radiatsiina bezpeka], Nuclear and Radiation Safety, No. 3 (55), pp. 51–56. (Rus).
7. Guidance on the Treatment of Uncertainties Associated with PRAs in Risk-Informed Decision Making: U. S. Nuclear Regulatory Commission, 2009, NUREG-1855, Vol. 1.
8. Abrahamsson M. (2002), Uncertainty in Quantitative Risk Analysis – Characterisation and Methods of Treatment, Lund. Report 1024.
9. Ishigami T., Ishikawa J., Shintani K., Mayumi M., Muramatsu K. (2004), An Approach to Evaluation of Uncertainties in Level 2 PSAs, OECD/NEA/CSNI/WGRISK Workshop.
10. Development of the Probabilistic Model of Level 1 Probabilistic Safety Analysis for Internal Events at NPPs with WWER-1000/320 [Rozrobka imovirnistnoi modeli imovirnistnoho analizu bezpeky AES iz VVER-1000/320 1-ho rivnia stosovno vnutrishnikh initsiatoriv], SSTC NRS, 2010. (Ukr).
11. Lyubarskiy A., Kuzmina I., El-Shanawany M. (2011), Notes on Potential Areas for Enhancement of the PSA Methodology Based on Lessons Learned from the Fukushima Accident, Proceedings of the 2nd Probabilistic Safety Analysis.
12. Limerick Generating Station Probabilistic Risk Assessment (1981), Philadelphia Electric Company, Docket, p. 350–353.
13. Zio E. (2013), "Risk Analysis. Literature Review of Methods for Representing Uncertainty".
14. Zadeh L. (1965), "Fuzzy Sets. Information and Control Theory", p. 338–353.
15. Durga K., Kushwaha H. , Vermab A., Srividya A. (2007), "Quantification of Epistemic and Aleatory Uncertainties in Level-1 Probabilistic Safety Assessment Studies", Reliability Engineering & System Safety, p. 947–956.

Получено 04.11.2014.