

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ МОДЕЛЕЙ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ ЭНЕРГООБЛОКОВ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

А.В. Антонов

Обнинский институт атомной энергетики, г. Обнинск



Рассмотрена задача анализа неопределенностей, вызванных существенной неадекватностью концептуальных и математических моделей, численной аппроксимацией, ошибками в вычислительных программах и ограничениями вычислительного процесса. В качестве методологии анализа предложены методы статистической теории подобия. Рассмотрен критерий Фишера, который является частным случаем моделей, полученных в рамках теории подобия. Приведен числовой пример, иллюстрирующий применение предложенной методики.

ВВЕДЕНИЕ

Вопросам обеспечения безопасной эксплуатации энергоблоков с ядерными реакторами уделяется большое внимание во всех развитых странах. Существуют требования Международного агентства по атомной энергетике (МАГАТЭ), а также требования национальных надзорных органов, согласно которым для всех действующих, строящихся и проектируемых атомных станций, необходимо проводить вероятностный анализ безопасности (ВАБ). Для решения данной задачи существуют методические рекомендации, например, "PROCEDURES FOR CONDUCTING PROBABILISTIC SAFETY ASSESSMENTS OF NUCLEAR POWER PLANTS (LEVEL 1 & 2)", в которых расписаны основные процедуры выполнения анализа. Большинство вопросов, решаемых в ходе выполнения ВАБ, имеют достаточно хорошо разработанное методическое обеспечение. При решении же ряда вопросов возникают трудности. К одному из таких проблемных вопросов относится анализ неопределенностей.

АНАЛИЗ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ

Целью этого раздела вероятностного анализа безопасности является определение количественных характеристик неопределенностей результатов ВАБ, а, именно, неопределенностей при оценке частоты повреждения активной зоны, частоты появления аварийных последовательностей и доминирующих аварийных последовательностей. Анализ неопределенностей является важной задачей ВАБ. Одно из преимуществ ВАБ состоит в том, что он может выявить ряд источников неопределенностей и помочь количественно оценить и наглядно представить значительную их часть. Поскольку модель

© А.В. Антонов, 1999

ВАБ только стремится отобразить реальность, то неизбежно существование упрощений, допущений и идеализаций сложных процессов и явлений. Результатом этих упрощений и идеализаций будут неопределенности в результатах. Можно выделить три основные категории источников неопределенностей в соответствующих моделях. А именно, следующие:

- **Полнота.** Главным назначением модели ВАБ является оценка возможных сценариев (последовательностей событий), которые могут привести к нежелательным последствиям – повреждению активной зоны. Однако нет гарантии, что этот процесс всегда будет полным и что все возможные сценарии выявлены и верно оценены. Этот недостаток полноты приводит к неопределенности в результатах и в выводах анализа, которые трудно проанализировать или определить количественно.

- **Адекватность моделирования.** Даже для тех сценариев, которые были определены, последовательность событий и логические модели систем не точно отражают реальность. Существуют неопределенности, вызванные существенной неадекватностью концептуальных и математических моделей, численной аппроксимацией, ошибками в вычислительных программах и ограничениями вычислительного процесса. Эти неопределенности рассматриваются как часть анализа неопределенностей ВАБ, причем для оценки их относительной значимости обычно проводятся исследования чувствительности результатов. Часть этих неопределенностей также можно рассчитать с использованием формального анализа неопределенности.

- **Неопределенность исходных параметров.** Параметры различных моделей, используемых в ВАБ, точно неизвестны вследствие недостаточности данных, изменчивости характеристик персонала и элементов станций, а также допущений, сделанных экспертами. Эта третья категория неопределенностей при современном состоянии методологии может быть наиболее успешно охарактеризована численно.

Неопределенность исходных параметров определяют следующим образом. Пусть $F_c(P_i, t)$ – оцениваемый показатель системы. Неопределенность в оценке показателя будет выражаться через дисперсию $D\{F_c(P_i, t)\}$, которая определяется в виде:

$$D\{F_c(P_i, t)\} = \sum \left(\frac{dF_c(P_i, t)}{dP_i} \right)^2 DP_i.$$

В данной формуле предполагается, что показатели $P_i(t)$ и $P_j(t)$ независимы по всем i и j , при $i \neq j$.

Что касается неопределенностей, связанных с полнотой анализа, то эта составляющая неопределенности обусловлена субъективными факторами. Уменьшение влияния полноты анализа достигается путем углубления исследования аварийных процессов и сценариев, приводящих к повреждению активной зоны. Анализ неопределенности, связанной с адекватностью моделирования, относится к категории формализуемых задач, решение которых, однако, имеет сложности. Остановимся на этом вопросе более подробно.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В ходе проведения ВАБ исследователи решают большое количество задач, связанных с расчетами характеристик надежности элементов, каналов, систем энергоблоков; вычислением частот внутренних и внешних исходных событий аварий; расчетами деревьев событий. Все перечисленные расчетные процедуры базируются на вероятностных моделях, описывающих явления, события и процессы, происходящие в реакторных установках. Объективных статистических данных для построения таких моделей, как правило, недостаточно, а зачастую они вообще отсутствуют. Поэтому для построения моделей используют теоретические разработки конкретной области приложения. Зада-

ча заключается в обосновании справедливости применения теоретических моделей для описания явлений, событий и процессов, происходящих в реакторной установке. Иными словами, задача состоит в доказательстве адекватности модели реально происходящим процессам.

Как известно, практика - критерий истины. Поэтому для решения задачи проверки адекватности модели необходима хотя бы минимальная статистическая информация об описываемых процессах, полученная на этапе эксплуатации. Пусть на основании выборки ограниченного объема данных о поведении описываемого процесса построена эмпирическая функция $F_3(t)$, по теоретическим данным построена функция $F_t(\beta, t)$, где β – вектор параметров модели, t – время. Необходимо проверить гипотезу: удовлетворяет ли модель $F_t(\beta, t)$ статистическим данным, полученным в ходе эксплуатации объекта?

МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Для решения поставленной задачи будем использовать результаты статистической теории подобия. Введем вектор $\rho = [\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_k]$, где

$$\rho_i = \frac{a_{3i}}{a_{Ti}}, \quad (1)$$

a_{3i} , a_{Ti} – однотипные параметры, рассчитанные по эмпирическим данным и на основании модели соответственно. Модель будет адекватно описывать эксплуатационные данные, если по каждому критерию ρ_i будет выполняться условие подобия, которое означает равенство единице отношения (1) для всех ρ_i . Поскольку параметры, входящие в выражение (1), в общем случае являются случайными величинами, то сам критерий (1) является функцией от случайных величин. В стохастической постановке принято считать, что условие подобия выполняется, когда критерий ρ_i находится в пределах верхней и нижней границ доверительного интервала

$$\rho_i \in [\rho_i^H, \rho_i^B]. \quad (2)$$

Таким образом, задача сводится к определению доверительного интервала (2) по каждому критерию ρ_i с одной и той же доверительной вероятностью. Если такие интервалы найдены и выражение (2) выполняется для всех i , то модель будет адекватна эмпирическим данным. Если хотя бы по одному критерию условие (2) не выполняется, то считать модель адекватной эмпирическим данным оснований нет. Методика определения доверительного интервала основана на определении плотности распределения критерия ρ_i . Пусть $F_\rho(k)$ – функция распределения случайной величины ρ , так что

$$F_\rho(k) = P(\rho < k) = P\left(\frac{a_{3i}}{a_{Ti}} < k\right).$$

Величины a_{3i} и a_{Ti} независимы, следовательно, их совместная плотность распределения есть произведение плотностей a_{3i} и a_{Ti} . Согласно [3], вероятность соотношения $a_{3i}/a_{Ti} < k$ выражается интегралом от совместной плотности распределения по области, определенной неравенствами $a_{Ti} > 0$, $a_{3i} < a_{Ti} k$:

$$F_\rho(k) = \int_{a_{Ti} > 0} \int_{a_{3i} < a_{Ti} k} f_{aT}(y) f_{a3}(z) dy dz.$$

Будем считать, что функция распределения $F_\rho(k)$ дифференцируема, т.е. существует плотность $f_\rho(k)$. Тогда определив вид плотности распределения статистики критерия ρ , можно определить доверительные границы из соотношений:

$$\int_0^p f_p(k) dk = \alpha,$$

$$\int_p^\infty f_p(k) dk = \alpha.$$

Более детально методика определения доверительных границ рассмотрена в [4,5].

Частным случаем статистической теории подобия является критерий Фишера. Рассмотрим данный критерий применительно к задаче проверки адекватности модели. Введем показатель – дисперсия воспроизводимости $S_{\text{вос}}^2$, который будет характеризовать точность оценивания показателя a_{ji} , полученного на основании эмпирических данных. Далее определим дисперсию адекватности $S_{\text{ад}}^2$, которая будет характеризовать отклонение эмпирических показателей от показателей, полученных на основании расчетов с использованием теоретической модели. Тогда, статистика критерия Фишера будет иметь вид:

$$\bar{F} = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_{\text{вос}}^2}.$$

Рассчитанное значение статистики критерия Фишера необходимо сравнить с табличным значением $F(q, \alpha)$, где q – количество степеней свободы, равное объему данных, на основании которых построена эмпирическая функция распределения, минус число наложенных связей, α – уровень значимости, с которым принимается гипотеза об адекватности модели.

Если $\bar{F} < F(q, \alpha)$, гипотеза об адекватности принимается, если $\bar{F} > F(q, \alpha)$ – гипотеза отвергается.

Пример.

Рассмотрим применение критерия Фишера проверки гипотезы адекватности модели к задаче расчета надежности канала аварийной защиты по скорости нарастания мощности в рабочем диапазоне системы аварийной защиты АЗ-5 энергоблоков 1-4 Курской АЭС. Следует отметить, что каналы, работающие на каждом блоке, идентичны. Функциональная схема канала приведена на рис.1. Логическая функция работоспособности канала имеет вид:

$$P_1 = P_{\text{БП-39}} \cdot P_{\text{КНК-53}} \cdot P_{\text{УЗС-13}}$$

$$P_2 = P_1 + P_{\text{сх.УЗС}} + P_{\text{сх.500}} - P_1 \cdot P_{\text{сх.УЗС}} - P_1 \cdot P_{\text{сх.500}} - P_{\text{сх.УЗС}} \cdot P_{\text{сх.500}} + P_1 \cdot P_{\text{сх.УЗС}} \cdot P_{\text{сх.500}}$$

$$P_k = P_2 \cdot P_{\text{З-или}}$$

$$K_T = P_2 \text{ из } 3 \cdot (3 \cdot P_k^2 - 2 \cdot P_k^3),$$

где $P_{\text{БП-39}}$, $P_{\text{КНК-53}}$, $P_{\text{УЗС-13}}$ и т.д. – вероятности безотказной работы соответствующих элементов. Характеристики надежности указанных элементов известны. Для проведения расчетов надежности данного канала построена имитационная модель, учитывающая наличие запасных элементов, наличие контроля за исправностью функционирования и профилактическое восстановление работоспособности канала. Из опыта длительной эксплуатации за период с момента пуска каждого блока до 1998 г. известно, что опасных отказов типа несрабатывание канала на требование ни на одном блоке зафиксировано не было, однако было зафиксировано два ложных срабатывания каналов, которые привели к останову блока. Отказы были зафиксированы в моменты $T_1 = 6816$ ч и $T_2 = 7483$ ч работы канала после соответствующего профилактического восстановления. Рассчитаем характеристики надежности канала. Расчетное время будем брать равным 8000 ч, т. к. через это время энергоблоки останавливают на профилактику, во время которой работоспособность элементов восстанавливается до первоначального уровня.

Таблица 1

Функция распределения

№ п/п	Интервал времени, ч.	Эмпирическое значение ВБР	Значение ВБР, рассчитанное по модели
1.	6816(-)	1	1
2.	6816(+)	0,9891	0.999828
3.	7483(+)	0,9782	0.999812
4.	8000	0,9782	0,9998

ня. Оценки ВБР, полученные на основании эмпирических данных, рассчитаны по результатам наблюдений за четырьмя идентичными комплектами оборудования в течение 24-26 лет в зависимости от пуска энергоблока. Общее количество наблюдений, таким образом, равно 92 ед. При этом случайная величина, характеризующая факт безотказного функционирования относительно аварийно-опасных отказов во всех случаях равна 1, а относительно ложных срабатываний в двух случаях равна 0, и в 90 случаях равна 1. Оценка вероятности безотказной работы (ВБР) канала относительно аварийно-опасных отказов, полученная на основании эмпирических данных равна $P_3(T)=1$, где $T=8000$ ч. На основании модельных расчетов для этой же характеристики получен результат $P_T(T) = 0,9998$. По отношению к ложным срабатываниям статистические данные позволяют построить эмпирическую функцию распределения. Информация по ложным отказам может быть

представлена в виде схемы с цензурированными наработками. Все остальные периоды функционирования имеют усеченную справа наработку, равную 8000 ч. Таким образом, при построении эмпирической функции распределения будем использовать методику ее оценивания по цензурированным наработкам. В табл.1 представлены значения эмпирической функции распределения (графа3) и значения, рассчитанные по модели (графа4). Определим для этих значений дисперсии воспроизводимости и адекватности. Основываясь на эмпирических данных, получаем, что дисперсия воспроизводимости равна $S^2_{вос}=0.033036$,

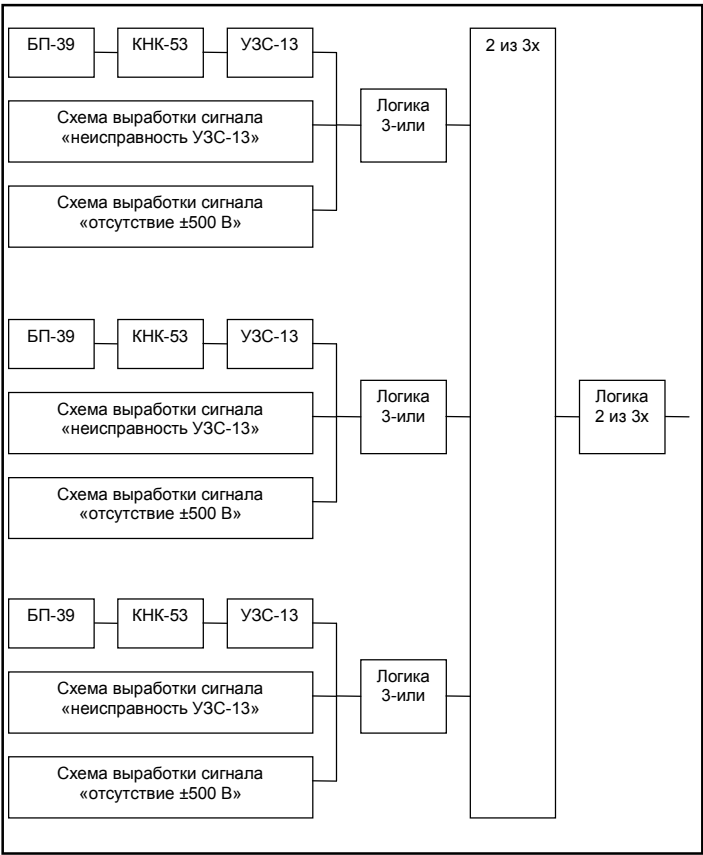


Рис. 1. Функциональная схема канала аварийной защиты по скорости нарастания мощности реактора в рабочем диапазоне (АЗСр)

дисперсия адекватности $S^2_{ад} = 0.00108$. Рассчитывая значение статистики Фишера, получаем

$$\bar{F} = \frac{0.00108}{0.033036} = 0.0327,$$

что значительно меньше табличного значения критерия Фишера и, следовательно, гипотезу об адекватности модели эмпирическим данным принять можно. Рассмотренный пример иллюстрирует возможность применения предлагаемого методического подхода к задачам анализа неопределенностей, вызванных существенной неадекватностью концептуальных и математических моделей, численной аппроксимацией, ошибками в вычислительных программах и ограничениями вычислительного процесса. К достоинствам метода следует отнести его способность давать оценку степени адекватности в условиях ограниченных статистических выборок.

Список литературы

1. PROCEDURES FOR CONDUCTING PROBABILISTIC SAFETY ASSESSMENTS OF NUCLEAR POWER PLANTS (LEVEL 1), IAEA, VIENNA, 1990.
2. PROCEDURES FOR CONDUCTING PROBABILISTIC SAFETY ASSESSMENTS OF NUCLEAR POWER PLANTS (LEVEL 2), IAEA, VIENNA, 1995.
3. Крамер Г. Математические методы статистики. - М.: Мир, 1975.
4. Антонов А.В., Острейковский В.А. Оценивание характеристик надежности элементов и систем ЯЭУ комбинированными методами. - М.: Энергоатомиздат, 1993.
5. Антонов А.В. Об одном методе проверки однородности информации в случае параметрического оценивания характеристик надежности // Надежность и контроль качества. - 1993. - №10. - С.20-32.
6. Скрипник В.М., Назин А.Е., Приходько Ю.Г. и др. Анализ надежности технических систем по цензурированным выборкам. - М.: Радио и связь, 1988.

Поступила в редакцию 21.12.98.

The developed fuel cycle with the large-scale utilization of thorium is a long-way outlook for Russia. However the useful features of thorium use in light water and fast reactors can be related in near future. These useful features relate to the safety improvement, less actinide accumulation and the better resistance to non-sanctioned use of fissionable materials.

The article is devoted to the parameters and problems of reactors which can help to start the thorium involvement in nuclear industry.

УДК 621.039.526:621.039.516.4

Integral Experiments on Critical Facilities and Reactors for Basing of Uranium-Thorium Cycle \ V.I.Golubev, A.V.Zvonarev, G.N.Manturov, Yu.S.Khomyakov, A.M.Tsiboulia; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 5 pages, 5 tables, 2 illustrations.

The uranium-thorium compositions with different moderator amount were studied on six critical facilities (KBR 18-23). The KBR-18..21 were created as the central subcritical cylindrical core made from enriched uranium oxide and metal thorium surrounded by igniter zone of enriched uranium. The material of central zone was to provide K_f value about 1. The hydrogen was added in the form of thin CH_2 foils and the $H/^{235}U$ nuclei ratio was from 0 up to ~70. The fuel enrichment was varied from 10 to 2.5%.

The KBR-22..23 were real critical systems with uranium-thorium core.

The criticality of system and K_f of central zone were measured in the experiments. In addition, ratio of ^{232}Th and ^{238}U capture and fission cross-sections to ^{235}U fission cross-section were measured in the central zone. The relative cross-sections of some transuranium elements were measured.

The experiments were made in the BN-350 reactor for thorium sample irradiation to define the intensity of ^{233}U accumulation and ^{232}U content. In addition the relative fission, capture and $(n,2n)$ cross-sections were measured in different zones of the reactor for ^{232}Th , ^{233}U and ^{231}Pa .

УДК 621.039.526:621.039.516.4.

Investigation of Thorium Irradiated in Lateral Blanket of Fast Reactor and in Thermal Spectrum of Graphite Reactor \ A.V.Zvonarev, B.Ya.Zil'berman, V.I.Ivanov, N.A.Nerozin, V.B.Pavlovich, B.A.Petrukhin, F.P.Raskach, E.Ya.Smetanin, L.V.Sytnik, M.F.Troyanov, Yu.S.Khomyakov, L.A.Chernov, I.G.Sheyner; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 5 pages, 2 tables, 2 illustrations.

To find the possibility for ^{232}U accumulation lower than 10 ppm, the IPPE had organized the irradiation of thorium samples in the lateral blanket of the BN-350 fast reactor and in the thermal graphite-water reactor with subsequent radiochemical analysis of irradiated samples. The main results of these works are presented in the article.

УДК 621.039.58

On the Problem of Estimation of Model Uncertainties During Probabilistic Analysis Providing Nuclear Power Plant Unit's Safety \ A.V. Antonov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 6 pages, 1 table, 1 illustration. - References, 6 titles.

The problem of analysis of uncertainties, which are caused by sufficient discrepancies of conceptual and mathematical models as well as by numerical approximation, errors in codes and limitations of calculation process is considered. Methods of the statistic resemblance theory are proposed as a method of analysis. The Fisher criterion is considered which is a particular case of models obtained in the frame of the resemblance theory. A numerical example is given to illustrate the application of proposed method.