

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА СМЕЩЕННОГО ИДЕАЛА ДЛЯ РЕШЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ, СВЯЗАННЫХ С ПРОЕКТИРОВАНИЕМ И ОБОСНОВАНИЕМ БЕЗОПАСНОСТИ ЯЭУ

В.С. Окунев

*Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана,
г. Москва*



Рассматриваются некоторые прикладные задачи, связанные с оптимальным проектированием и обоснованием безопасности ЯЭУ, сформулированные как задачи многокритериальной оптимизации. Одна из них – задача выбора предпочтительных компоновок активной зоны. Другая – задача ранжирования параметров РУ БРЕСТ-2400 по степени влияния на функционалы безопасности.

ПРИКЛАДНЫЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ

Оптимальное проектирование (неоптимальное проектирование не имеет смысла) и обоснование безопасности ядерных энергетических установок (ЯЭУ) нового поколения как математические процедуры предполагают принятие решений. Общую методологию принятия решений относят к исследованию операций [1].

Практически все прикладные задачи, связанные с оптимизацией и обоснованием безопасности реакторных установок (РУ) требуют формирования системы критериев, по которым предполагается принимать решения. Как правило, практические задачи являются многокритериальными, т.е. требуют принятия решений по многим критериям. При этом необходимо исключить волевою (значит, отчасти, случайную) процедуру принятия решений и минимизировать влияние субъективного фактора на принимаемое решение.

Известны два основных подхода к решению многокритериальных задач. Один из них предполагает сведение исходной задачи к задаче математического программирования (задаче с единственным критерием оптимальности). При этом субъективное воздействие вносится сразу и полностью на этапе формулировки задачи. Задачи математического программирования в детерминистской постановке привлекают возможностью полной формализации их решения и определенностью с точки зрения анализа получаемых результатов. Немаловажно, что такие задачи (при условии совместности), как правило, имеют единственное решение. Цель оптимального проектирования ЯЭУ – получение единственного предпочтительного (оптимального) вари-

анта, который и будет реализован (построен). Основным критерий корректности перехода от многокритериальной задачи к задаче математического программирования – совпадение их решений, что практически недостижимо в задачах оптимального проектирования ЯЭУ. С точки зрения исследования операций более корректным считается другой подход: решение многокритериальных задач специально разработанными методами [1].

Многокритериальные задачи отличаются более корректной постановкой (по сравнению с задачами математического программирования), хотя их решение – более сложная процедура, которую в принципе нельзя полностью формализовать. Как следствие – неопределенность в результатах и неудовлетворенность лица, принимающего решение («конфликт после решения»). С целью минимизации субъективного фактора и неудовлетворенности принятым решением обычно используют несколько методов решения многокритериальных задач. При этом субъективное вмешательство носит распределенный характер, т.е. вносится и на этапе постановки задачи, и в процессе ее решения. Необходимо четкое разграничение процедур, выполняемых на основе естественного (человеческого) и искусственного интеллекта, или по крайней мере минимизация нечеткости такой границы [2]. Кроме того, необходимо минимизировать размерность задач, решаемых человеком без использования компьютера, до уровня, в определенной мере гарантирующего четкость восприятия и мышления, что требует предварительной подготовки оптимального объема необходимой информации для принятия решений. Таким образом, решение многокритериальных задач большой размерности в большинстве практических случаев предполагает использование диалогового режима работы с компьютером.

Практически любую проблемную ситуацию можно рассматривать как многокритериальную задачу.

Формализм и методы исследования операций, включая решение многокритериальных задач, использовались для решения некоторых прикладных задач. В числе таких задач – задача выбора наиболее опасных аварийных ситуаций (из числа *ATWS* – сопровождающихся отказом аварийной защиты) и ранжирования аварийных ситуаций по степени опасности, сформулированная как дискретная многокритериальная задача, критерии которой – функционалы, определяющие самозащищенность РУ (функционалы безопасности: максимальные температуры компонентов активной зоны и другие в аварийных режимах работы РУ), объекты – аварийные ситуации и их комбинации, не исключенные детерминистически [3]. Задача решалась в детерминистской постановке и в условиях неопределенности и недостаточности исходной информации [3] с использованием принципа максимина (или максиминной стратегии кооперативной игры). Для решения задачи выбора предпочтительного теплоносителя энергетического реактора на быстрых нейтронах и ранжирования теплоносителей по степени предпочтительности [2, 4] использовались лексикографические методы, устанавливающие отношение лексикографического порядка между объектами задачи. Исходная непрерывная многокритериальная задача предварительно сводилась к дискретной. Критерии задачи объединены в четыре группы:

- 1) широкий диапазон рабочих температур – низкая температура замерзания, высокая температура кипения и к.п.д. цикла, максимальный диапазон рабочих температур;

- 2) технология – основные компоненты конструкционных материалов, решена ли проблема коррозии конструкционных материалов, возможность образования интерметаллидов, возможность решения проблем в рамках существующих технологий;

- 3) нейтронно-физические свойства – долговременная наведенная активность, возможность снижения пустотного эффекта реактивности (ПЭР);

4) внутренняя самозащищенность от аварий типа *ATWS*: аварии с ухудшением условий теплоотвода (*LOHS WS*), аварии с увеличением мощности (*TOP WS*), совокупность тяжелых аварий.

В качестве объектов задачи рассматривались потенциальные теплоносители: жидкие металлы (Li, Na, K, Cs, Ga, Pb, Bi) и их сплавы, включая сплавы щелочных металлов с тяжелыми (с разной концентрацией компонентов).

Одна из задач – двухкритериальная задача непрерывной оптимизации компоновки активной зоны быстрого реактора на максимум мощности и минимум ПЭР с ограничениями для функционалов, определяющих надежность и самозащищенность РУ [5], – решена на основе идей позиционных игр (последовательного принятия решений).

Задача выбора предпочтительных месторождений свинца (для использования в качестве теплоносителя быстрого реактора) с высоким содержанием дважды магического изотопа ^{208}Pb (как побочного продукта ториевых руд) [6] решена методом смещенного идеала [7]. Метод предполагает формирование идеального (часто недостижимого на практике) и антиидеального объектов из наиболее и наименее предпочтительных критериев соответственно, последовательное (итерационное) исключение худших (по заданным критериям) объектов [7]. В качестве критериев задачи рассматривались содержание свинца в руде (максимизация), содержание изотопов ^{207}Pb (минимизация) и ^{208}Pb (максимизация) в свинце [6]. Объекты задачи – пробы, взятые из ториевых месторождений.

В настоящей работе рассматриваются две задачи.

1. Многокритериальная задача выбора предпочтительных компоновок активной зоны быстрого реактора из конечного числа вариантов, каждый из которых (объект многокритериальной задачи) получен в результате решения вспомогательной задачи математического программирования или бескритериальной задачи поиска области безопасных компоновок в пространстве управлений с использованием программного комплекса «ДРАКОН-М» [3]. Задача решена на примере РУ типа БН тепловой мощности 2100 МВт с МОХ-топливом и традиционной компоновкой активной зоны (под традиционной понимается компоновка, состоящая из зон малого и большого обогащения, окруженных боковой и торцевыми зонами воспроизводства).

2. Задача ранжирования параметров РУ по степени влияния на самозащищенность (на примере реактора БРЕСТ большой мощности с замкнутой газотурбинной установкой – БРЕСТ-2400/ЗГТУ [8]).

Эти задачи решены методом смещенного идеала [7]. Одна из проблем использования метода смещенного идеала – практическая недостижимость идеального объекта – недоступность сформированного идеала. Как результат – неудовлетворенность лица, принимающего решение [7].

ВЫБОР ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНЫХ КОМПОНОВОК АКТИВНОЙ ЗОНЫ. УСЛОВНО РАВНОБЕЗОПАСНЫЕ И УСЛОВНО РАВНООПАСНЫЕ КОМПОНОВКИ

В задачах проектирования и анализа безопасности РУ может оказаться актуальной проблема выбора единственного варианта компоновки, характеризующегося наибольшей безопасностью (безопасность можно охарактеризовать совокупностью количественных критериев: функционалами безопасности) или выбора нескольких «равнобезопасных» компоновок из допустимого множества (множества безопасных компоновок) – списка вариантов, предложенного лицу, принимающему решение. Очевидно, что равнобезопасными, в строгом смысле этого слова, могут быть лишь тождественно одинаковые компоновки, но для принятия решений можно говорить об

условной равнобезопасности или ввести термин «условно равнобезопасные компоновки».

Какие компоновки можно считать условно равнобезопасными? Все объекты многокритериальной задачи (безопасные компоновки активной зоны), представленные для анализа, могут обладать разной степенью самозащищенности от разных типов аварий, т.е. их априори нельзя считать равнобезопасными.

Существуют методы оценки и выбора предпочтительных решений по многим критериям. С помощью таких методов можно выбрать наиболее предпочтительный объект (вариант компоновки) с точки зрения возможности обеспечения безопасности. Если таких объектов (например, вариантов компоновки) несколько и если они практически неразличимы по совокупности принятых критериев многокритериальной задачи (например, по безопасности), то эти варианты можно считать условно равнобезопасными. Неразличимость объектов по совокупности критериев, например, в методе смещенного идеала, можно интерпретировать как равноудаленность этих реальных объектов задачи (реальных компоновок в пространстве принятых критериев качества – функционалов безопасности) от специально сформированного антиидеального объекта, т.е. «неразличимые» объекты находятся на одинаковых расстояниях от антиидеального. Если единицы измерения критериев одинаковы (обычно используют безразмерные критерии), то в двухкритериальной задаче неразличимые объекты принадлежат окружности, а в трехкритериальной – сфере, центром которой является антиидеальный объект.

Подмножество предпочтительных объектов многокритериальной задачи (вариантов компоновки активной зоны) можно считать оптимальными по Парето. Парето-оптимальные объекты, в свою очередь, можно считать эквивалентными.

Таким образом, условно равнобезопасные компоновки – Парето-оптимальные объекты многокритериальной задачи, где в качестве критериев рассматриваются функционалы безопасности, характеризующие различные аварийные ситуации, не исключенные детерминистически. Чем больше критериев имеет задача, тем более обосновано употребление понятия «условно равнобезопасные компоновки». Если необходимо решить задачу оптимального проектирования РУ, в которой тяжелые аварии исключены детерминистически, можно предварительно исключить из рассмотрения доминируемые объекты, к которым следует отнести компоновки активной зоны, полученные при нарушении хотя бы одного из ограничений из всей совокупности ограничений для функционалов безопасности, характеризующих все наиболее опасные аварийных ситуации.

В общем случае условно равнобезопасными компоновками следует считать эквивалентные объекты многокритериальной задачи, где в качестве критериев рассматриваются функционалы безопасности, характеризующие всю совокупность аварийных ситуаций, не исключенных детерминистически. Однако, если для данного типа проектируемой РУ идеалы естественной безопасности в принципе недостижимы, то эти выделенные эквивалентные объекты могут относиться и к доминируемым (заведомо наименее предпочтительным или недопустимым с точки зрения принятых критериев). Такие компоновки разумнее отнести к «условно равноопасным».

Таким образом, в задаче выбора условно равнобезопасных компоновок активной зоны интерес представляет не просто выделение эквивалентных объектов многокритериальной задачи, а объектов, являющихся предпочтительными, оптимальными по Парето.

Получение условно равнобезопасных и условно равноопасных компоновок актуально, если разрабатываемая РУ априори не удовлетворяет требованиям естественной безопасности, а при ее проектировании необходимо приблизиться к идеалам

естественной безопасности насколько это возможно (если, вообще, возможно) за счет совершенствования физических и технических решений. Характерный пример – РУ типа БН средней и большой мощности с оксидным топливом. Как известно, в таких реакторах роль доплеровского коэффициента реактивности в аварийных ситуациях типа *TOP* (инициированных вводом положительной реактивности) и *LOF* (инициированных обесточиванием главных циркуляционных насосов) противоположна [9]. Проблема усугубляется при отказе аварийной защиты (режимы *TOP WS* и *LOF WS* соответственно) [3].

В общем случае решение задач оптимального проектирования с ограничениями для функционалов безопасности, характеризующих только режим *TOP WS* для РУ такого типа, приводит к получению компоновки активной зоны, не обладающей свойством самозащищенности от аварий *LOF WS*, и наоборот. Оптимизация носит ярко выраженный конфликтный характер: можно получить компоновку, обладающую свойством самозащищенности от одного класса аварий, и не обладающую таким свойством по отношению к другому классу аварий. Требование одновременного выполнения ограничений для функционалов, характеризующих режимы *TOP WS* и *LOF WS*, носит конфликтный характер. При отсутствии пассивных систем задача оптимального проектирования может оказаться несовместной. В этом случае и приходится вводить понятие «условно равноопасные» компоновки.

Для иллюстрации выбраны пять разных вариантов (табл. 1) традиционных компоновок активной зоны РУ типа БН тепловой мощности 2100 МВт с МОХ-топливом, обладающих (за исключением варианта 1) свойством самозащищенности от комбинации ситуаций *TOP WS* и *LOF WS*. В табл. 1 приведены управляющие параметры (параметры, за счет изменения которых достигалось выполнение ограничений для функционалов (включая функционалы безопасности), характеризующих комбинацию режимов *TOP WS* + *LOF WS*), функционалы, характеризующие режим работы на номинальной мощности, и два функционала безопасности (максимальная температура теплоносителя в переходном и установившемся режимах). Компоновки получены с помощью расчетно-оптимизационного комплекса «ДРАКОН-М» [3] при решении задачи без критерия оптимальности – на поиск области безопасных компоновок в пространстве управлений. Варианты 2–4 – три разные точки такой области (табл. 1). Вариант 3 (табл. 1) – реактор с внутренней зоной воспроизводства.

Рис. 1 иллюстрирует возможность сравнения этих вариантов по разным критериям. (В общем случае число критериев может быть большим, но конечным). На рис. 1 пять различных компоновок активной зоны (табл. 1) представлены в виде пяти объектов многокритериальной задачи. Для наглядности рассматривается задача на максимум двух критериев: температурных запасов до кипения теплоносителя в переходном и установившемся (в результате действия обратных связей по реактивности) режимах (рис. 1а). Разброс значений выбранных критериев приблизительно одинаков, значимость учета этих критериев с точки зрения обеспечения самозащищенности также одинакова. Критерии можно считать равнозначными. Объекты задачи (варианты компоновок) в предположении равнозначности критериев можно ранжировать по степени предпочтительности следующим образом: $5 \succ 3 \succ 2 \succ 4 \succ 1$, причем объект 1 является недопустимым (доминируемым) – соответствует кипению натрия, а объект 5 совпадает с идеальным объектом данной задачи. Принято считать, что чем больше разброс критерия, тем выше его информативность. При сравнении объектов 2, 3 и 4 (рис. 1а) критерий «температурный запас до кипения теплоносителя в установившемся режиме» не информативен (значения критерия одинаковы для этих объектов и их сравнение проводится по критерию «температурный запас до кипения теплоносителя в переходном режиме»).

Таблица 1

Варианты компоновки РУ типа БН

	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Вариант 5
<i>Управляющие параметры</i>					
Обогащение топлива (ЗМО / ЗБО), %	18 / 21	4,596 / 28,07	- / 25,09	15,04 / 19,91	15,96 / 18,20
Диаметр топливной таблетки ⁽¹⁾ , мм	5,98 / 5,98	5,148 / 5,000	5,150 / 5,150	5,295 / 5,315	4,524 / 4,972
Относительный шаг решетки твэлов ⁽¹⁾	1,160 / 1,160	1,151 / 1,200	1,149 / 1,193	1,178 / 1,176	1,183 / 1,152
Объемная доля чехлов ТВС ⁽¹⁾ , %	7 / 7	4,634 / 7,060	4,500 / 6,306	6,969 / 6,969	6,451 / 6,504
Объемная доля межкассетного теплоносителя ⁽¹⁾ , %	9 / 9	7,704 / 4,639	6,992 / 4,150	8,899 / 8,899	8,182 / 8,223
Радиальные размеры зон ⁽¹⁾ , см	82,00 / 46,00	93,07 / 39,16	95,84 / 40,90	83,77 / 46,28	89,10 / 45,84
Высота активной зоны, см	95,0	109,7	114,2	95,4	100,4
Номинальный массовый расход теплоносителя ⁽¹⁾ , кг/(м ² ·с)	6700 / 6800	5607 / 8949	5640 / 9000	6800 / 7154	6648 / 6089
<i>Функционалы (режим работы на номинальной мощности)</i>					
Средняя температура теплоносителя, К	743	730			
Макс. температура топлива ⁽¹⁾ , К	2656/2801	1259/2779	968/2588	2059/2379	1680/1993
Макс. температура оболочек твэлов ⁽¹⁾ , К	895 / 909	762 / 892	710 / 876	840 / 875	824 / 898
КВА	0,79	0,77	0,84	0,86	0,90
Макс. температура теплоносителя ⁽¹⁾ , К	862 / 862	755 / 852	709 / 851	822 / 852	811 / 882
Максимальная линейная нагрузка на твэлы (ЗМО/ЗБО), Вт/см	392,9 / 421,8	110,5 / 399,8	58,13 / 368,2	266,8 / 328,7	182,6 / 242,2
Объем активной зоны, м ³	4,890	6,026	6,712	5,070	5,743
<i>Функционалы безопасности</i>					
Максимальная температура теплоносителя (переходный режим) ⁽²⁾ , К	1131/кипит / 1155 / кипит	895 / 1142 / 913 / 1155	848 / 1143 / 869 / 1156	1058 / 1134 / 1080 / 1155	1051/1113 / 1070 / 1132
Макс. температура теплоносителя (установившийся режим) ⁽²⁾ , К	1103/1155 / 1125 / кипит	862 / 1076 / 877 / 1088	816 / 1066 / 834 / 1077	1026 / 1097 / 1046 / 1116	1015 / 1071 / 1032 / 1088
Макс. температура топлива (переходный режим) ⁽¹⁾ , К	2873 / 3061	Уменьшается в переходном режиме			

Примечания.

(1) Приведены значения для двух радиальных зон: первая – зона малого обогащения (ЗМО) и зона воспроизводства над ней, вторая – зона большого обогащения (ЗБО) и зона воспроизводства над ней.

(2) Приведены значения для четырех зон: ЗМО, ЗБО, зона воспроизводства над ЗМО, зона воспроизводства над ЗБО.

Рис. 16 иллюстрирует решение задачи максимизации максимальной линейной нагрузки (q_l^{\max}) на твэлы и коэффициента воспроизводства активной зоны (КВА) (цель – $\text{КВА} \rightarrow 1$, что позволит минимизировать запас реактивности на выгорание). Поскольку объект 1 доминируемый и должен быть исключен из рассмотрения, идеальный (И) и антиидеальный (А) объекты задачи (не существующие в действительности) формируются на объектах 2, 3, 4, 5.

Пример, представленный на рис. 1а иллюстрирует возможность выбора единствен-

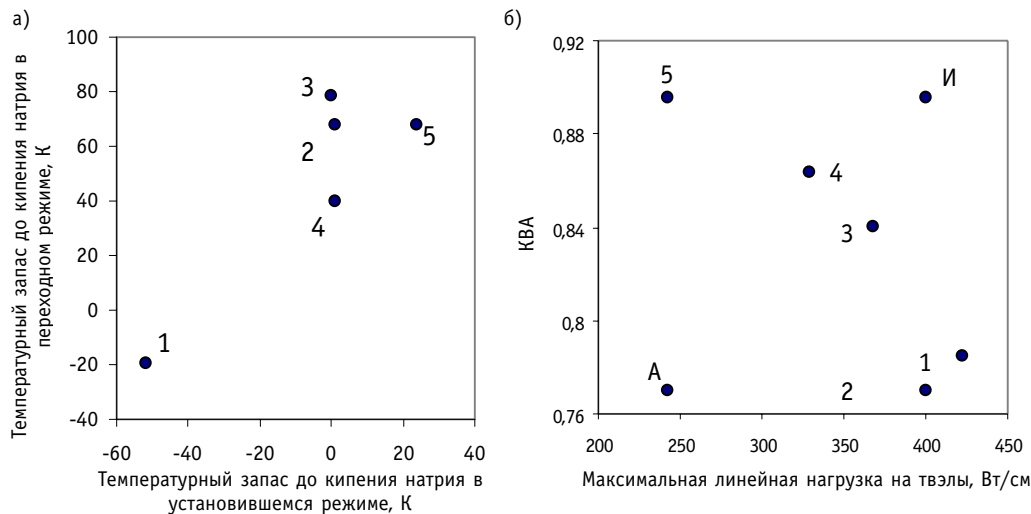


Рис. 1. Иллюстрация к решению дискретной двухкритериальной задачи: объекты – варианты традиционной компоновки РУ типа БН-800 с МОХ-топливом

ного предпочтительного (оптимального) варианта; на рис. 1б проиллюстрирована сложность такого выбора (по двум другим критериям).

Основная проблема решения многокритериальных задач связана с неоднородностью пространства критериев – критерии качества имеют различные единицы измерения. Решению проблемы способствует переход к относительным критериям и использование коэффициентов относительной важности критериев [7]. Эти коэффициенты задаются лицом, принимающим решение, или экспертами.

В рассматриваемом случае переход к относительным критериям осуществляется следующим образом. Вариант 5 характеризуется максимальным значением КВА для допустимых вариантов (2–5). Это значение ($KVA=0,9$) принимается за единицу (единичный относительный критерий) по шкале КВА. Вариант 2 характеризуется максимальным значением q_l^{\max} (399,8 Вт/см) среди допустимых вариантов. Это значение принимается за единицу по шкале q_l^{\max} .

Для оценки важности критериев (для определения коэффициентов важности) существуют различные подходы [7]. В данной задаче может быть использован информационный подход, когда более информативному критерию придается большее значение коэффициента важности. Относительный разброс q_l^{\max} и КВА (определяющий информативность критерия) для допустимых вариантов 0,39 и 0,15 соответственно. Эти разбросы характеризуют информативность критериев и могут рассматриваться как коэффициенты важности для q_l^{\max} и КВА. Из анализа вариантов 2–5 (табл. 1) следует, что увеличение q_l^{\max} от 242,2 до 399,8 Вт/см приводит к уменьшению КВА от 0,90 до 0,77. Иначе говоря, увеличение максимальной линейной нагрузки на 100 Вт/см приводит в среднем к уменьшению КВА на 0,08.

Переходя к относительным критериям и учитывая коэффициенты важности, можно считать, что по критериям q_l^{\max} и КВА объекты (варианты компоновок) эквивалентны (2 ~ 3 ~ 4 ~ 5) и оптимальны по Парето.

Таким образом, увеличение КВА приводит к ухудшению другого критерия качества: возможно за счет снижения линейной нагрузки на твэлы. Дальнейшее увеличение КВА (по крайней мере в рамках традиционной компоновки активной зоны) может привести к нарушению ограничений задачи.

РАНЖИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РУ БРЕСТ-2400/ЗГТУ ПО СТЕПЕНИ ВЛИЯНИЯ НА ФУНКЦИОНАЛЫ БЕЗОПАСНОСТИ

Поскольку коэффициенты чувствительности различных функционалов F_i (где $i = 1, 2, \dots, I$), в том числе функционалов безопасности, к различным параметрам v_n ($n = 1, 2, \dots, N$), могут иметь разную размерность, определение параметров, оказывающих наибольшее влияние на безопасность РУ, возможно на основе сравнения относительных значений $G_{i,n}$ коэффициентов чувствительности функционалов к этим па-

раметрам: $G_{i,n} = dF_i / dv_n \cdot v_n / F_i$. Наиболее значимому параметру соответствует максимальное абсолютное значение $|G_{i,n}|$. В этом физический смысл относительных коэффициентов чувствительности.

Безопасность РУ в целом характеризуется большим числом функционалов, соответствующих различным аварийным ситуациям. Очевидно, что число функционалов и параметров, описывающих конструкцию и свойства РУ, конечно. В этом случае задачу ранжирования различных параметров реактора по степени влияния на безопасность можно сформулировать как дискретную многокритериальную и решать известными методами. При большой размерности задачи можно использовать, например, метод смещенного идеала [7].

На рис. 2 и 3 представлены эффективные объекты дискретной многокритериальной задачи выбора параметров, оказывающих наибольшее влияние на самозащищенность РУ БРЕСТ-2400/ЗГТУ [8] от совокупности аварий *LOF WS* и *TOP WS* (рис. 2) и от наложения режимов (*LOF + TOP + LOHS*) *WS* (рис. 3). Критерии H_k задачи – абсолютные значения относительных коэффициентов чувствительности функционалов безопасности $H_k = |G_{i,n}|$, где $i = 1, 2, \dots, I$; $n = 1, 2, \dots, N$; $k = 1, 2, \dots, K$; $K = I \times N$. Для иллюстрации в качестве критериев задачи ранжирования параметров РУ БРЕСТ-2400/ЗГТУ по степени влияния на безопасность рассматриваются абсолютные значения относительных коэффициентов чувствительности следующих функционалов безопасности: H_1 – максимальной температуры оболочек твэлов в переходном режиме *LOF WS*; H_2 – максимальной температуры топлива в переходном режиме *LOF WS*; H_3 – максимальной температуры топлива в установившемся в результате действия обратных реактивных связей состоянии *TOP WS*; H_4 – максимальной мощности в установив-

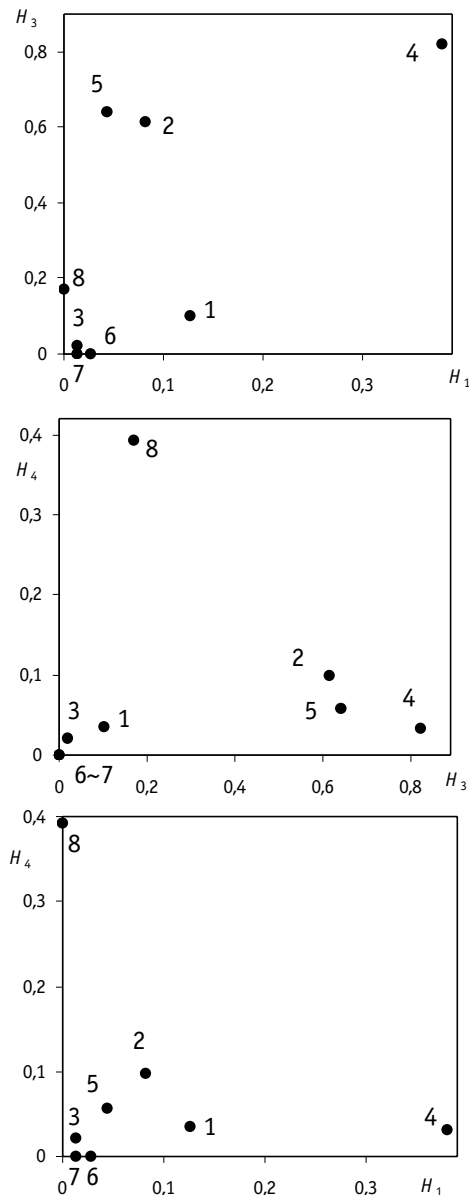


Рис. 2. Иллюстрация к решению задачи выбора параметров, оказывающих наибольшее влияние на самозащищенность реактора БРЕСТ-2400 от совокупности аварий *LOF WS* и *TOP WS* (без их наложения)

шемся состоянии *TOP WS*, H_5 – максимальной температуры оболочек твэлов в центральной зоне профилирования в ситуации *LOF WS* в режиме естественной циркуляции теплоносителя.

Объекты задачи (обозначены цифрами на рис. 2 и 3): 1 – средняя скорость свинцового теплоносителя, 2 – диаметр топливной таблетки, 3 – высота топливного столба, 4 – относительный шаг решетки твэлов, 5 – объемная доля топлива, 6 – время уменьшения расхода в режиме *LOF WS*, 7 – плотность топлива в центральной зоне, 8 – введенная реактивность, 9 – время ввода реактивности, 10 –

время изменения температуры свинца на входе в активную зону в процессе *LOHS WS*, 11 – эффективная высота контура естественной циркуляции, 12 – новое значение температуры свинца на входе в активную зону в процессе *LOHS WS*. Объекты 1–5, 7 соответствуют центральной зоне профилирования РУ БРЕСТ-2400/ЗГТУ [8].

В задаче максимизации H_k (где $k = 1, 2, \dots, K$) наиболее предпочтительный объект и есть наиболее значимый с точки зрения влияния на самозащищенность РУ.

Если при решении задачи выбора предпочтительной компоновки (рис. 16) важность критериев определяется на основе информационного подхода, то в задаче ранжирования параметров РУ БРЕСТ-2400/ЗГТУ по степени влияния на безопасность, используется другой способ, основанный на учете того факта, что критический элемент РУ типа БРЕСТ в обеспечении самозащищенности – оболочка твэлов (в аварийных режимах имеются значительные запасы по температуре топлива и теплоносителя). В этом случае наиболее важные (значимые для обеспечения самозащищенности РУ) критерии H_1 и H_5 .

По результатам анализа *LOF WS* можно сделать следующий вывод. По наиболее важным критериям: (H_1 , H_5), при условии равнозначности этих критериев, объекты задачи по степени предпочтительности можно ранжировать следующим образом: 4 f 2 f 1 f 3 ~ 5 f 6.

Выводы по данным, представленным на рис.2.

- Объект 4 наиболее предпочтителен (а по критериям, характеризующим режим *TOP WS*, конкурирует с объектом 8), т.е. варьирование относительного шага решетки твэлов оказывает наибольшее влияние на самозащищенность реактора от совокупности аварийных ситуаций *LOF WS* и *TOP WS*.

- Влияние введенной реактивности (объект 8) на самозащищенность от аварий типа *TOP WS* очевидно.

- При относительно малой введенной реактивности (меньше доли запаздывающих нейтронов) варьирование относительного шага решетки твэлов оказывает большее влияние на самозащищенность от аварий типа *TOP WS*.

В координатах (H_1 , H_2) при наложении (*LOF* + *TOP* + *LOHS*) *WS* наиболее значимые объекты 8, 11, 12 (рис. 3).

Таким образом, одним из наиболее значимых параметров, влияющих на обеспечение самозащищенности РУ БРЕСТ-2400/ЗГТУ от аварий типа *ATWS* является относительный шаг решетки твэлов.

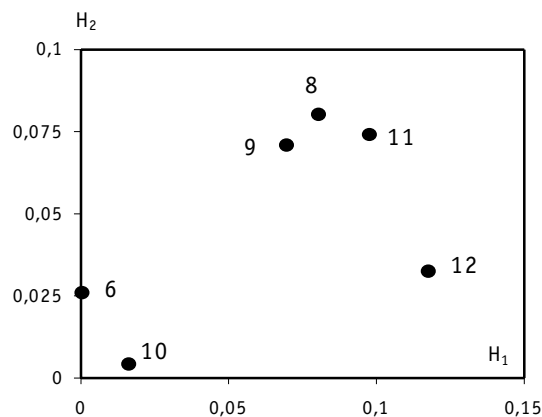


Рис. 3. Иллюстрация к решению задачи выбора параметров, оказывающих наибольшее влияние на самозащищенность реактора БРЕСТ-2400 при наложении (*LOF* + *TOP* + *LOHS*) *WS*

Из рис. 2 и 3 можно легко получить численные значения абсолютных значений относительных коэффициентов чувствительности.

Литература

1. Волков И.К., Загоруйко Е.А. Исследование операций: Учеб. для вузов/Под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. (Серия «Математика в техническом университете». – Вып. XX).
2. Окунев В.С. Принятие решений в задачах проектирования ЯЭУ и обоснования их безопасности/Образование через науку: Тез. докл. Международной конф. (Москва, 2005). – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2005. – С.474 – 475.
3. Кузьмин А.М., Окунев В.С. Использование вариационных методов для решения задач обеспечения и обоснования естественной безопасности реакторов на быстрых нейтронах. – М.: МИФИ, 1999.
4. Окунев В.С. Некоторые вопросы использования жидких металлов и их сплавов для охлаждения реакторов на быстрых нейтронах/Отчет НИИЭМ МГТУ им.Н.Э.Баумана. – 2004. – 241 с.
5. Окунев В.С. Максимизация мощности быстрого реактора со свинцово-висмутовым теплоносителем//Атомная энергия. – 2001. – Т. 90. – Вып. 3. – С.234-241.
6. Окунев В.С. Резервы концепции «БРЕСТ» (при переходе к энергоблокам большой мощности)/ Научная сессия «МИФИ-2006»: Сб. научн. тр. – М.: МИФИ, 2006. – Т.8. – С. 89-90.
7. Елтаренко Е.А. Оценка и выбор решений по многим критериям: Учебн. пособие. – М.: МИФИ, 1995.
8. Иванов В.Л., Калишевский Л.Л., Козлов О.С. и др. Аналитическое и расчетное обеспечение проектных решений АЭС с реактором БРЕСТ большой мощности (БРЕСТ-2400) и газотурбинным циклом преобразования энергии/Ядерные реакторы на быстрых нейтронах: Тр. Российского науч.-технич. форума (Обнинск, 8-12 декабря 2003 г.).
9. Хаммел Г., Окренг Д. Коэффициенты реактивности в больших энергетических реакторах на быстрых нейтронах (пер. с англ.). – М.: Атомиздат, 1975.

Поступила в редакцию 24.04.2006

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 621.039.58

Development and Application of Methods for Property Change Discovery and Time Series Forecasting in NPP Diagnostics Problems \ A.O. Skomorokhov, P.A. Belousov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2006. – 9 pages, 7 illustrations. – References – 25 titles.

Property change discovery and time series forecasting are basic problems of technical diagnostics. The paper consists of a brief review of methods for data stream processing. These methods are used for developing of Data Stream Management Systems in the world. Authors suggested to use DSMS for solving different problems of technical diagnostics.

УДК 621.039.58

Fuzzy Probability Models for Estimating Reliability Indicators for NPP Equipment \ Y.V. Volkov, D.S. Samokhin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2006. – 12 pages, 6 illustrations, 7 tables. – References – 11 titles.

Developed model allows to take into account “fuzzy” information on failures of pieces of equipment during the estimating of reliability indicators and carrying out the probabilistic analysis of safety of nuclear technology objects. Estimation rests upon initial information, significant part of which is due to be analysed by experts. Processing of the results of expert survey gives the best characteristics of the reliability and contains estimation of co-ordination of experts’ opinions and exposure of the reasons of heterogeneity.

УДК 621.039.58: 519.8

The Method of the Displaced Ideal Utilization for Solution of the Some Applied Problems Concerned with Designing and Safety Substantiation of the NPP \ V.S. Okunev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2006. – 10 pages, 3 illustrations, 1 table. – References – 9 titles.

Some applied problems concerned with optimal designing and safety substantiation of the NPP, stated as multicriteria optimization problems, are considered. One of them is the problem of selection of the preferable composition of core. The other one is the problem of ranking of the parameters of BREST-2400 in order of influence on the safety functionals.

УДК 621.039.516

On the Problem of Neutron Multiplying in the Deep Sub-Criticality Media \ V.A. Grabeznoj, V.A. Doulin, V.V. Doulin, G.M. Mihailov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2006. – 9 pages, 1 illustration, 3 tables. – References – 9 titles.

Method of determination of neutron multiplication in deep sub-critical multiplying medium was developed. It is based on a modification of Rossi-alpha method. The method consists in measurement of integral over time (area method) of correlated part of distribution and integral in area independent of time of as part of distribution (area of constant background), instead of the measurement of the constants of recession of neutron density α . It allows to carry out the calculated analysis, with the help of time integral equation for a neutron flux without representation of point kinetic model. During the calculation of space – correlation factor the solution of conjugate (relative to the count rate of detector) inhomogeneous equation is used. Its calculation is realized taking into account fission both in multiplying medium and in a source of spontaneous neutrons. To obtain multiplication of neutrons (and effective multiplication factor) in the medium the knowledge of effective lagging neutrons is not required. Measurements with plutonium – steel and uranium – steel blocks and blocks made of uranium dioxide of various enrichments have been carried out. Measured values of neutron multiplication in a range 0.15 – 0.45 are well adjusted with results of calculations.