

## НЕЧЕТКО ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МОДЕЛИ В ОЦЕНКАХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК

**Ю.В. Волков, Д.С. Самохин**

*Обнинский государственный технический университет атомной энергетики,  
г. Обнинск*



Разработана модель, позволяющая учитывать “нечеткую” информацию по отказам элементов оборудования при оценке показателей их надежности и проведении вероятностного анализа безопасности объектов ядерных технологий. Расчет опирается на исходную информацию, значительная часть которой должна анализироваться экспертами. Обработка результатов экспертного опроса дает наилучшие характеристики надежности и включает оценку степени согласованности мнений экспертов и выявление причин неоднородности.

### ВВЕДЕНИЕ

Проблеме оценки показателей надежности оборудования реакторных установок (РУ) уделяется большое внимание во всем мире. Одна из основных задач, решаемая, например, при проведении вероятностного анализа безопасности (ВАБ), это оценка показателей надежности по данным эксплуатации оборудования. В случае, если информация по отказам оборудования носит четкий характер (т.е. корректно приведены время отказа системы, причина и описание отказа с четким обозначением отказавшего элемента), не возникает особых препятствий и затруднений при оценках показателей надежности исследуемого оборудования. Существует множество различных методик, позволяющих делать такие оценки по данным эксплуатации [1, 2].

Однако основные трудности возникают тогда, когда информация по отказам оборудования оказывается неопределенной. Примером такой информации могут служить данные по отказам оборудования с пропусками в графе «время отказа», «размытое» или нечеткое описание причины отказа, не позволяющее определить первопричину отказа системы. Зачастую в графе «причина отказа» можно обнаружить фразу «причина отказа не установлена» или «вина проектной организации» и т.п. Этот факт значительно затрудняет использование эксплуатационной информации по отказам оборудования при анализе данных и подготовке информационно-аналитических материалов об опыте эксплуатации РУ, а также при подготовке исходных данных для расчета показателей надежности систем и оборудования РУ.

Принципиальная позиция авторов состоит в том, что *поскольку отказы оборудования на объектах ядерных технологий являются редкими событиями, то обоснованное использование любой, даже нечеткой информации о них является полезным, т.к. повышает точность оценок показателей надежности.*

---

© Ю.В. Волков, Д.С. Самохин, 2006

Здесь приведен метод, позволяющий структурировать нечеткую информацию по отказам, а также количественно оценить нечеткую информацию по отказам оборудования, обеспечивая данные для дальнейших расчетов.

В основе предложенного метода оценки характеристик надежности и ресурса лежит экспертный опрос с применением лингвистических переменных теории нечетких множеств [3–5]. Использование экспертного опроса и лингвистических переменных в задачах оценки характеристик надежности и ресурса даст возможность определения уровня безопасности для объектов, информация о которых недостаточна.

Предлагаемая авторами схема обработки любой эксплуатационной информации на РУ об отказах оборудования и их причинах приведена на рис. 1. В соответствии с этой схемой, если информация об отказах «четкая», то она сразу подвергается количественной обработке [1, 2]. В случае «нечеткой» информации, ее обработка может идти двумя путями. Наиболее сложен случай (самая правая ветвь на схеме), когда нечеткой является как информация о причине отказа системы, (например, о том, какой именно элемент системы привел к ее отказу), так и информация о показателях надежности элементов системы. Случай, когда нечеткой является только информация о причине отказа системы, более прост и формально является частным случаем более сложной ситуации, описанной выше. Далее рассмотрим методику обработки нечеткой информации, представленную на самом сложном примере (самая правая ветвь на схеме рис. 1).

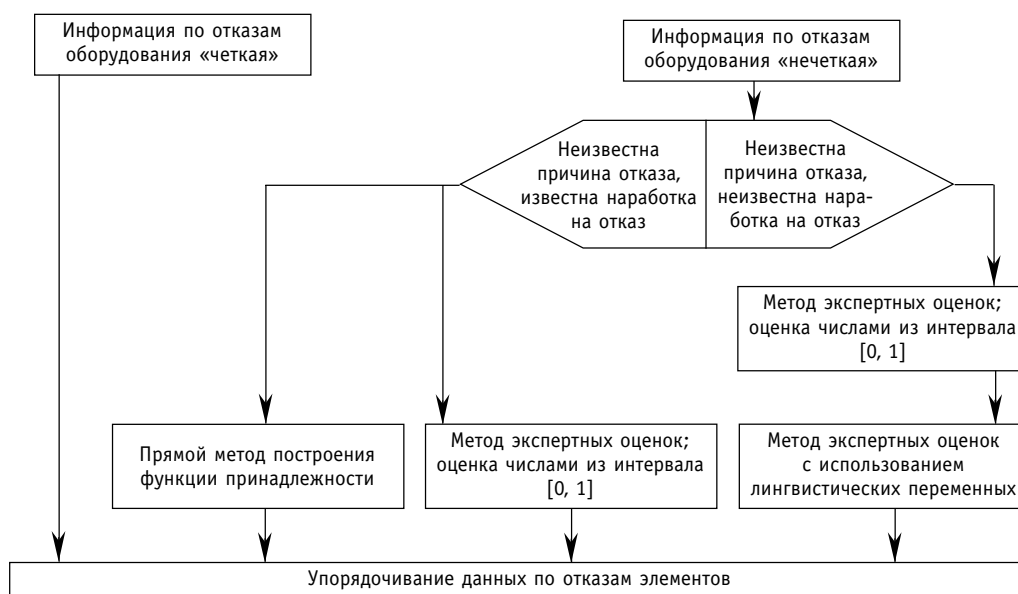


Рис. 1. Схематическое изображение процесса подготовки эксплуатационных данных по отказам оборудования РУ к проведению расчетов показателей их надежности

## МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРТНЫХ ОЦЕНОК

Необходимость использования лингвистических переменных обоснована тем, что при обработке эксплуатационных данных часто возникает сложность в проведении расчетов, связанная с отсутствием точных данных (полное или частичное отсутствие, невозможность прочтения или «расшифровки» данных) по времени отказа рассматриваемой системы. В этом случае необходимо определиться не только с элементом, отказ которого стал причиной отказа всей системы, но также с наработкой на отказ этого элемента.

## 1. Определение причины отказа системы

Предлагается реализовать следующий метод экспертных оценок, для определения причины отказа системы, с максимальной функцией принадлежности этой причины к отказу всей системы.

Процедура экспертного опроса делится на этапы.

**Первый этап.** Организаторы опроса выдвигают несколько предположений о том, что явилось, по их мнению, главной причиной нарушения нормальной эксплуатации рассматриваемой системы. Группе, состоящей из  $m$  экспертов, предоставляется информация о возможной причине выхода из строя этой системы. Среди выдвигаемых предположений можно выделить три основные группы:

- а) причина, связанная с отказом оборудования;
- б) причина, связанная с ошибками человека;
- в) причина, связанная с внешним(и) воздействием(ями).

Выдвинутые предположения фиксируются в таблице опросного листа экспертов (табл. 1).

В таблице строки с номерами от 1 до  $n$  содержат точное указание события (отказ элемента системы, ошибка эксплуатационного персонала с указанием рабочего места, внешний фактор), повлекшего за собой отказ всей системы. Значения лингвистических переменных с номерами от 1 до  $n$  предоставляются организаторами экспертного опроса. Также отводится место для того, чтобы эксперты выдвигали свои предположения о причине возникновения рассматриваемого события, строки с номерами от 1 до  $h$ . При получении дополнительных предположений проводится повторный опрос с включением в опросный лист новых предположений. Помимо самой таблицы, в заглавной части опросного листа приводится подробная информация об отказе рассматриваемой системы. Информация по этому отказу полностью переносится из соответствующей графы журнала учета технической неисправности оборудования.

**Второй этап** заключается в подборе группы экспертов. Экспертная группа составляется на основании РД-03-13-94 №41 [6]. Участники экспертного опроса должны отвечать минимальному набору предъявляемых требований: высокому уровню общей эрудиции, высокому профессиональному уровню в оцениваемой области, способности перспективно мыслить и наличию производственного и исследовательского опыта в данной области [7].

**Третий этап** заключается в проведении самого опроса экспертов. В ходе опроса каждый  $j$ -й эксперт выставляет оценку из интервала  $[0; 1]$  в  $i$ -й строке, выражая свою уверенность в том, что главной причиной выхода из строя рассматриваемой системы стала именно  $i$ -я. Оценка эксперта «0» соответствует тому, что данная причина не могла вызвать возникновение отказа системы, и наоборот, оценка «1» говорит о том, что данная причина могла вызвать возникновение отказа рассматриваемой системы. Соответственно выставляя некоторую промежуточную оценку (0.1; 0.2; 0.3; 0.4; ...), эксперт показывает степень уверенности при принятии решения по данному вопросу.

Таблица 1

**Таблица опросного листа нескольких экспертов**

Причина отказа \ Эксперт	1	2	...	$m$
1				
2				
...				
$n$				
<i>Дополнительные предположения экспертов</i>				
1				
2				
...				
$h$				

Для целей анализа эксплуатационной информации по отказам оборудования РУ экспертам предлагается руководствоваться соотношениями табл. 2, данные которой являются аналогией функции желательности Харингтона [5].

**Четвертый этап.** Проводится анализ результатов экспертного опроса  $m$  специалистов. На основе экспертной оценки строим функцию принадлежности  $\tilde{\mu}_i(x)$  для каждой строки табл. 1, что в нашем случае показывает степень принадлежности события к отказу системы:

$$\tilde{\mu}_i(x) = \sum_{j=1}^m x_{ij} k_j, \quad (1)$$

где  $m$  – число экспертов;  $i = \overline{1, n+h}$  – рассматриваемый элемент;  $k_j$  – коэффициент компетентности  $j$ -го эксперта;  $x_{ij}$  – оценка  $j$ -го эксперта значения переменной с координатами  $(i, j)$  из опросного листа нескольких экспертов (табл. 1).

Информация, полученная от экспертов, должна быть тщательно проверена на согласованность мнений экспертов, ведь результаты работы группы экспертов неизбежно будут содержать отпечаток субъективизма, вносимого как самими экспертами, так и организаторами экспертного опроса. Это является неизбежной платой за возможность получить количественные оценки там, где раньше ограничивались лишь качественным описанием. Поэтому обработка результатов экспертного опроса включает оценку степени согласованности мнений экспертов и выявление причин неоднородности. Определение согласованности мнений экспертов производится путем вычисления числовой меры (коэффициента компетентности  $k_j$ ), характеризующей степень близости индивидуальных мнений/оценок. Только при согласованности мнений экспертов можно утверждать, что в результате экспертизы получена достоверная информация.

Для получения групповой оценки в этом случае можно воспользоваться средним значением оценки для каждого объекта (1).

Коэффициент компетентности является нормированной величиной:

$$\sum_{j=1}^m k_j = 1. \quad (2)$$

Коэффициенты компетентности экспертов можно вычислить по апостериорным данным, т.е. по результатам оценки рассматриваемых событий, входящих в список причин отказа системы. Основной идеей этого вычисления является предположение о том, что компетентность эксперта должна оцениваться по степени согласованности его оценок с групповой оценкой объектов.

Алгоритм вычисления коэффициентов компетентности экспертов имеет вид рекуррентной процедуры [8]:

$$\tilde{\mu}_i^t(x) = \sum_{j=1}^m x_{ij} k_j^{t-1} \quad i = 1, n+h; \quad (3)$$

$$d^t = \sum_{i=1}^{n+h} \sum_{j=1}^m x_{ij} \tilde{\mu}_i^t(x) \quad (t = 1, 2, 3, \dots); \quad (4)$$

$$k_j^t = \frac{1}{d^t} \sum_{i=1}^{n+h} x_{ij} \tilde{\mu}_i^t(x) \quad \sum_{j=1}^m k_j^t = 1 \quad j = 1, m. \quad (5)$$

Вычисления начинаются с  $t = 1$ . В формуле (3) начальные значения коэффициентов компетентности принимаются одинаковыми и равными  $k_j^0 = \frac{1}{m}$ . Подробное описание определения коэффициентов компетентности экспертов приведено в [10]. В

этой же работе рассмотрен вопрос о сходимости рекуррентной процедуры вычисления этих коэффициентов.

Следует отметить, что чем больше различия в  $k_j$  для разных экспертов, тем хуже согласованность их мнений, и больше различие в уровне их знаний в данной проблеме. Например, в пределе, если для какого-либо  $p$ -го эксперта в результате оценок получено  $k_p = 1$ , а остальные получают нулевые коэффициенты компетентности, то такая группа экспертов не может считаться хорошо подобранной.

После определения коэффициентов компетентности экспертов, по формуле (1) находим функции принадлежности для каждого элемента, находящегося на рассмотрении.

**Пятый этап.** Все рассмотренные возможные причины отказа системы расставляются по приоритетам: первой возможной причиной считается имеющая самую большую функцию принадлежности, и так расставляются все причины по мере убывания функции принадлежности. Окончательное решение о причине отказа системы может быть только волевым.

## 2. Определение неизвестного показателя надежности элемента

Предположим, что в соответствии с процедурой из п. 1 установлено, что причиной отказа системы явился отказ какого-то ее элемента, а показателя его надежности (например, средней наработки на отказ) в справочниках нет, и что длительность работы элемента в составе системы из описания ее отказа определить невозможно, поэтому нельзя использовать какую-либо процедуру оценки показателей надежности из предложенных в работах [1, 2]. В этой ситуации плодотворной может оказаться изложенная в предыдущем разделе процедура экспертного опроса с последующей числовой обработкой ее результатов, использующей методы теории нечетких множеств для анализа лингвистических переменных.

Заметим, что в данном случае и таблица опросного листа нескольких экспертов (табл. 1), и таблица со шкалой желательности (табл. 2) должны выглядеть несколько иначе.

Здесь следует отметить, что значений лингвистических переменных и их комбинаций так много, что отобразить все возможные случаи в опросном листе не представляется возможным. Наиболее приемлемой, по мнению авторов, является процедура учета лингвистических переменных, представляющих собой высказывания типов «ограничение» и «цель» [9] с использованием числовых значений. Примерами высказываний типа «цель» могут служить следующие: «наработка на отказ компрессора должна быть  $3 \cdot 10^5$  ч» или «расходомер был поставлен в работу 25.05.1995». В свою очередь, высказывания типа «ограничение» могут быть двух видов: высказывания, определяющие нижнюю границу исследуемой величины (например, «наработка на отказ компрессора должна быть не меньше  $3 \cdot 10^5$  ч» или «расходомер был поставлен в работу не позднее, чем 25.05.1995»), и высказывания, определяющие верх-

Таблица 2

### Шкала желательности

Желательность	Отметка на шкале желательности
Уверен, что причина отказа именно в этом	1.00 – 0.80
Скорее всего, причина отказа именно в этом	0.80 – 0.63
Возможно, что это является причиной отказа	0.63 – 0.37
Маловероятно, что причина отказа именно в этом	0.37 – 0.20
Скорее всего, причина отказа не в этом	0.20 – 0.00

нюю границу (например, «наработка на отказ компрессора должна быть не больше  $3 \cdot 10^5$  ч» или «расходомер был поставлен в работу не ранее, чем 25.05.1995»).

Таким образом, в ходе проведения опроса группы экспертов имеет смысл ограничиться использованием следующих лингвистических переменных: «...значение должно быть близко к ...», «предполагаемое значение исследуемой величины должно быть больше, чем ...», «предполагаемое значение исследуемой величины должно быть не больше, чем ...» и т.п.

Чтобы избежать влияния организаторов опроса на мнения экспертов, необходимо предложить самим экспертам проставить числовые значения на место многоточий в лингвистических переменные. В итоге могут быть получены наборы лингвистических переменных, состоящие из  $A_1, A_2, \dots, A_f$  – лингвистических переменных, определяющих нечеткую цель,  $B_1, B_2, \dots, B_d$  – лингвистических переменных, определяющих нечеткое нижнее ограничение для исследуемой величины и  $\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_g$  – лингвистических переменных, определяющих нечеткое верхнее ограничение ( $f, d, g \leq m$ ). Соответственно значения числовых переменных (допустим, наработки на отказ элементов), взятых из соответствующих лингвистических переменных, будут:  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_f$  – нечеткая цель,  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_d$  – нечеткое нижнее ограничение,  $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_g$  – нечеткое верхнее ограничение. Разумеется, значения лингвистических переменных должны быть взаимно согласованы, т.е. должны выполняться следующие условия:

$$\min_i(\beta_i) \leq \min_j(\gamma_j); \max_i(\beta_i) \leq \max_j(\gamma_j); i = \overline{1, d}; j = \overline{1, g} \quad (7)$$

и

$$\min_i(\beta_i) \leq \alpha_k \leq \max_j(\gamma_j); k = \overline{1, f}; i = \overline{1, d}; j = \overline{1, g}. \quad (8)$$

В опросный лист включаются все полученные лингвистические переменные, по которым необходимо высказать свои суждения всем  $m$  экспертам (табл. 3).

Шкала желательности должна иметь такой вид, как показано в табл. 4.

Производится анализ результатов экспертного опроса  $m$  специалистов. На основе экспертной оценки строятся функции принадлежности  $\mu_i(\alpha_i)$ ,  $\mu_i(\beta_i)$ ,  $\mu_i(\gamma_i)$  (в данном случае они показывают степень предпочтительности рассматриваемой лингвистической переменной, а точнее наработку на отказ  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$ ,  $\gamma_i$ , взятых из соответствующих лингвистических переменных):

Таблица 3

**Таблица опросного листа  
нескольких экспертов при оценке  
наработки на отказ системы**

Эксперт	1	2	...	$m$
Лингвистическая переменная				
$A_1(\alpha_1)$				
...				
$A_f(\alpha_f)$				
$B_1(\beta_1)$				
...				
$B_d(\beta_d)$				
$\Gamma_1(\gamma_1)$				
...				
$\Gamma_g(\gamma_g)$				

Таблица 4

**Шкала желательности**

Желательность	Отметка на шкале желательности
Уверен, что это высказывание верно	1.00 – 0.80
Скорее всего, это высказывание верно	0.80 – 0.63
Возможно, что это высказывание верно	0.63 – 0.37
Маловероятно, что это высказывание верно	0.37 – 0.20
Скорее всего, это высказывание неверно	0.20 – 0.00

$$\mu_i(\alpha_i) = \sum_{j=1}^m x_{ij} \cdot k_j, \quad i = \overline{1, f}; \quad (9)$$

$$\mu_i(\beta_i) = \sum_{j=1}^m x_{ij} \cdot k_j, \quad i = \overline{1, d}; \quad (10)$$

$$\mu_i(\gamma_i) = \sum_{j=1}^m x_{ij} \cdot k_j, \quad i = \overline{1, g}, \quad (11)$$

где  $m$  – число экспертов;  $k_j$  – коэффициент компетентности  $j$ -го эксперта, определяется из рекуррентной процедуры (3)–(5);  $x_{ij}$  – оценка  $j$ -го эксперта значения переменной с координатами  $(i, j)$  из опросного листа (табл. 3).

Далее необходимо определить  $\alpha$  – значение наработки на отказ, определяющее нечеткую цель;  $\beta$  – значение наработки на отказ, определяющее нечеткое нижнее ограничение;  $\gamma$  – значение наработки на отказа определяющее нечеткое верхнее ограничение.

Это можно сделать, используя типовые виды функций принадлежности, применяемые в теории нечетких множеств [9], приведенные на рис. 2.

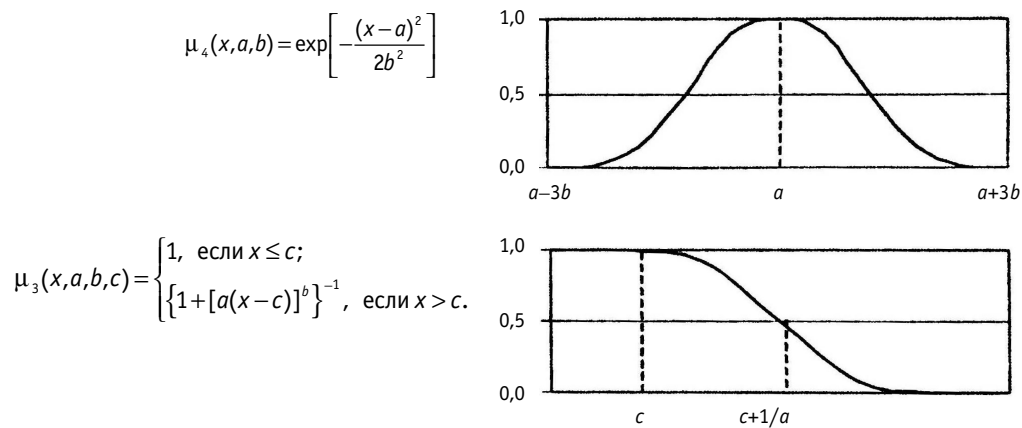


Рис. 2. Примеры способов построения функций принадлежности [9]

С использованием  $\mu_4(x, a, b, c)$  получаем следующую функцию принадлежности для нечеткой цели  $A$

$$\mu_A(z) = \exp\left[-\frac{(z-a)^2}{2b^2}\right], \quad (12)$$

параметры которой  $(a, b)$  можно оценить, например, методом наименьших квадратов, используя результаты опроса  $\mu_i(\alpha_i)$ .

Нечеткое нижнее ограничение  $B$  может быть представлено в виде следующей функции принадлежности:

$$\mu_B(z) = \begin{cases} \left[1 + [\alpha(z - \beta)]^{-1}\right]^{-1}, & \text{при } z > \beta; \\ 0, & \text{при } z \leq \beta, \end{cases} \quad (13)$$

которая получена из  $\mu_3(x, a, b)$  при  $b = -1$ . Параметры  $\alpha$  и  $\beta$  подбираются по зависимости  $\mu_i(\beta_i)$ .

Нечеткое верхнее ограничение  $\Gamma$  может быть представлено в виде следующей функции принадлежности:

$$\mu_{\Gamma}(z) = \begin{cases} \left[1 - [\alpha(z - \gamma)]^{-1}\right]^{-1}, & \text{при } z < \gamma; \\ 0, & \text{при } z \geq \gamma. \end{cases} \quad (14)$$

Параметры  $\alpha$  и  $\gamma$  подбираются по зависимости  $\mu_i(\gamma_i)$ .

Далее, в зависимости от полученных данных и требований к качеству результата оценок наработки на отказ  $\theta$  можно поступить двумя способами.

1. Если оценщику требуется получить наилучшую оценку, удовлетворяющую только вместе и цели  $A$ , и нижнему ограничению  $B$ , и верхнему ограничению  $\Gamma$ , то строится функция принадлежности вида

$$\mu(z) = \mu_A(z) \mu_B(z) \mu_{\Gamma}(z). \quad (15)$$

Если какая-либо из лингвистических переменных ( $A$ ,  $B$ ,  $\Gamma$ ) отсутствует, то в формуле (15) соответствующей функции принадлежности присваивается значение 1 для всех  $z$ .

2. Часто возникают ситуации, когда эксперты не могут сформулировать твердое суждение о предмете в виде цели. Поэтому в таблице опроса оказываются только лингвистические переменные в виде ограничений. В этом случае допустимы [9] следующие определения функции принадлежности

$$\mu(z) = \mu_B(z) \mu_{\Gamma}(z) \quad (16)$$

и

$$\mu(z) = \mu_{B \cup \Gamma}(z) = \min\{\mu_B(z), \mu_{\Gamma}(z)\}. \quad (17)$$

Вне зависимости от выбора вида  $\mu(z)$  ((15), (16) или (17)) ищется

$$\mu(z^*) = \max_z \mu(z). \quad (18)$$

Величина  $z^*$  из (18), доставляющая максимум функции  $\mu(z)$ , является наилучшей оценкой наработки на отказ  $\theta$ , и она может быть разной для функций принадлежности, определяемых по формулам (15), (16) или (17).

### ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ

Описанный метод применен при анализе аварийных срабатываний АЗ на реакторе ВВР-ц. Результаты этого анализа приведены в работе [11]. Однако, поскольку не всем читателям известна и интересна проблематика аварийных срабатываний АЗ на реакторе ВВР-ц, авторы считают возможным и необходимым провести здесь иллюстрацию возможностей предлагаемого подхода на простом, понятном всем житейском примере, содержащем долю шутки. Поскольку у одного из авторов статьи есть проблемы с излишним весом, на кафедре РКР АЭС был проведен экспертный опрос: какого человека при росте 180 см можно считать толстым (не худым и не очень толстым). В роли экспертов выступали сотрудники кафедры, имеющие разные собственный вес и рост. Всего в опросе принимало участие 6 экспертов. Сначала был предложен опросный лист с таблицей, аналогичной табл. 1, где в первом столбце были приведены высказывания, воспроизведенные в первом столбце табл. 5.

Во втором столбце табл. 5 предоставлены результаты обработки таблицы опроса по процедуре с формулами (1)–(5).

Далее, экспертам было предложено самим определить:

- 1) какого человека можно считать толстым (цель);
- 2) границу по весу между худым и толстым (нижнее ограничение);
- 3) границу между толстым и очень толстым (верхнее ограничение).

В итоге получилась совокупность высказываний, приведенная во втором столбце табл. 6. В третьем столбце таблицы приведены результаты обработки данных по формулам (1)–(5).



На рис. 3 приведена подобранная по данным табл. 6 теоретическая зависимость (12) (кривая 1), а также зависимость, подобранная по совокупности данных из табл. 5 и 6 (кривая 2). Видно, что уважая мнение организаторов опроса, эксперты поставили ненулевые значения функции принадлежности для значений весов, предложенных организаторами, в то время как сами эксперты эти значения не предложили. Вследствие этого вторая зависимость оказалась более размытой и имеет смещение максимума; поэтому для уменьшения влияния мнений организаторов, по-видимому, при организации опросов следует избегать соблазна охватить как можно более широкую область возможных значений переменных. Хорошо подобранная команда экспертов сама в состоянии разобратся в проблеме.

Таблица 5

**Результат обработки данных экспертного опроса, выполненного с использованием первого подхода**

Человека при росте 180 см можно считать толстым, если его масса в кг составляет	Функция принадлежности $\mu(x)$
70	0
85	0,02
90	0,14
100	0,34
110	0,63
120	0,84
150	0,82
180	0,37
200	0,22
250	0,02
300	0

Таблица 6

**Лингвистические переменные и функции принадлежности, полученные в ходе экспертного опроса**

	Лингвистическая переменная	$\mu_i(\alpha_i)$
Лингвистические переменные, определяющие нечеткую цель: можно считать толстым, если вес	близок к 100 кг	0,34
	близок к 105 кг	0,53
	близок к 110 кг	0,71
	близок к 120 кг	0,86
	близок к 140 кг	0,62
	близок к 150 кг	0,50
		$\mu(\beta_i)$
Лингвистические переменные, определяющие нечеткое нижнее ограничение: нельзя считать худым, если вес	больше, чем 90 кг	0,35
	больше, чем 95 кг	0,55
	больше, чем 100 кг	0,85
	больше, чем 150 кг	0,93
	больше, чем 160 кг	0,98
		$\mu(\gamma_i)$
Лингвистические переменные, определяющие нечеткое верхнее ограничение: будет не очень толстым, если вес	не больше, чем 115 кг	0,81
	не больше, чем 120 кг	0,65
	не больше, чем 130 кг	0,54
	не больше, чем 140 кг	0,29
	не больше, чем 150 кг	0,101
	не больше, чем 180 кг	0,016

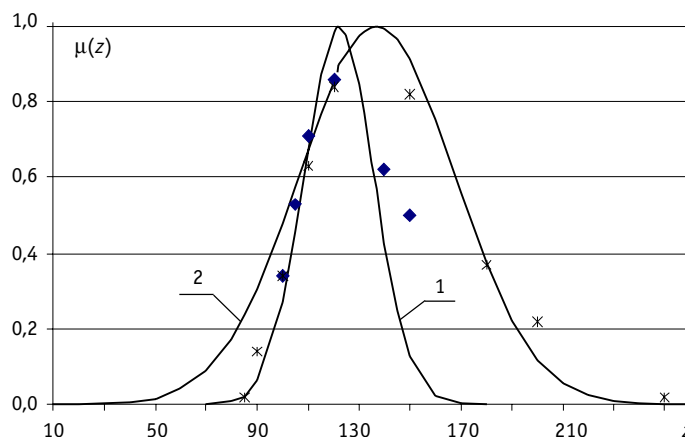


Рис. 3. Теоретическая и экспериментальная зависимости функции принадлежности, определяющей нечеткую цель, от значения массы человека, ростом 180 см: ◆ – экспериментальная зависимость  $\mu_i(\alpha_i)$  (табл. 6); 1 – теоретическая зависимость  $\mu(z)$ ; 2 – теоретическая зависимость с учетом лингвистических (табл. 6) и числовых переменных (табл. 5), полученным в ходе экспертного опроса; × – экспериментальная зависимость (табл. 5, 6)

Из рис. 3 видно также, что результаты работы экспертов, расположенные в правой (ниспадающей) части зависимости  $\mu_d(z)$ , имеют больший разброс возле теоретической зависимости, чем в левой части. Это связано, по-видимому, с тем, что эксперты более четко различают понятия «худой» и «толстый», чем «толстый» и «очень толстый». Поэтому в общем случае при организации экспертных опросов для оценок показателей надежности объектов ядерных технологий необходимо стремиться к тому, чтобы лингвистические переменные, содержащие нижнее и верхнее ограничения, в сознании экспертов воспринимались с примерно равной четкостью.

На рис. 4, 5 показаны зависимости  $\mu_B(z)$  и  $\mu_T(z)$ . Видно, что действительно нижнее ограничение в этом примере более четко воспринимается экспертами, чем верхнее.

На рис. 6 приведены оценки зависимости  $\mu(z)$  по формулам (15)–(17). Видим, что хотя оценки по формуле (15) дают более определенный результат, чем остальные (зависимость  $\mu(z)$  более узкая), максимум  $\mu(z^*) = 0,59$  при 129 кг наименьший (по формулам (16) и (17) имеем  $\mu(z^*) = 0,66$  при 111 кг и  $\mu(z^*) = 0,76$  при 99 кг соответственно). Следовательно, имеет смысл принять тезис о том, что по оценкам экспертов человек при росте 180 см, имеющий вес около 100 кг, как правило (в 76% случаев), может считаться толстым.

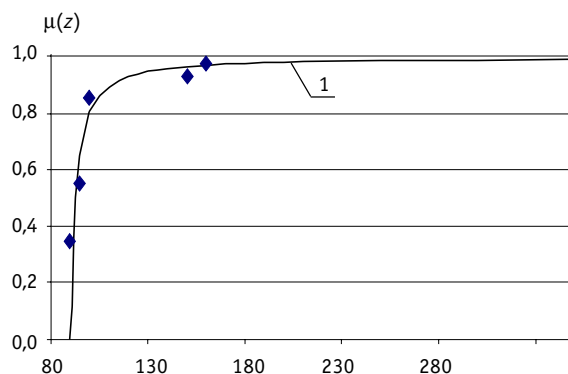


Рис. 4. Теоретическая и экспериментальная зависимости функции принадлежности, определяющей нечеткое нижнее ограничение, от значения массы человека, ростом 180 см: ◆ – экспериментальная зависимость  $\mu_i(\beta_i)$  (табл. 6); 1 – теоретическая зависимость  $\mu(z)$

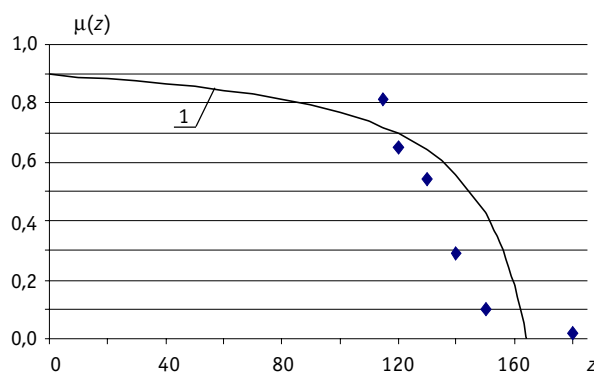


Рис. 5. Теоретическая и экспериментальная зависимости функции принадлежности, определяющей нечеткое верхнее ограничение, от значения массы человека, ростом 180 см:  $\blacklozenge$  – экспериментальная зависимость  $\mu_i(\gamma_i)$  (табл. 6); 1 – теоретическая зависимость  $\mu(z)$

В заключение примера приведем и прокомментируем обезличенную табл. 7, содержащую оцененные коэффициенты компетентности экспертов.

Начальное (среднее) значение коэффициента компетентности должно быть  $1/6 \approx 0.167$ . Видим, что рассчитанные по формулам (3)–(5) коэффициенты сильно различаются для разных экспертов. Наименее компетентным оказался эксперт № 1 с наименьшим собственным весом, т.е. самый далекий от проблемы излишнего веса. Самыми компетентными оказались

эксперты с номерами 4,6, для которых эта проблема наиболее актуальна. К ним примыкает эксперт № 3, но он, являясь организатором опроса, даже не имея проблем с излишним весом, лучше всех разобрался в проблеме. Таким образом, оценки коэффициентов компетентности экспертов имеют смысл и могут дать объективную информацию о качестве подбора команды экспертов.

Таблица 7

**Коэффициенты компетентности экспертов**

№ эксперта	Коэффициент компетентности ( $k$ )
1	0,05
2	0,13
3	0,22
4	0,21
5	0,16
6	0,23

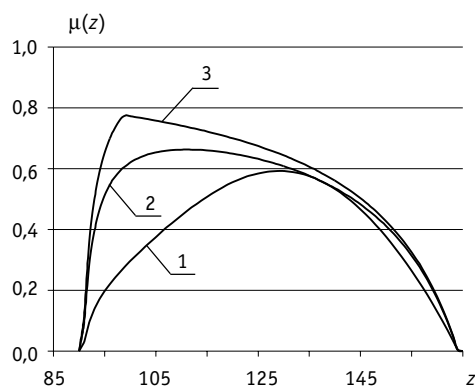


Рис. 6. Итоговая оценка функций принадлежности: 1 – функция  $\mu(z)$ , вычисленная по формуле (15); 2 – функция  $\mu(z)$ , вычисленная по формуле (16); 3 – функция  $\mu(z)$ , вычисленная по формуле (17)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен подход к оценке показателей надежности по данным эксплуатации оборудования любого характера: четкого, нечеткого и любого сочетания данных типов информации. Особое внимание уделено учету и обработке нечеткой информации.

В результате проведенной работы появилась возможность при анализе эксплуатационной информации по отказам оборудования реакторных установок использовать не только четкую количественную информацию, но также и качественную информацию, содержащую, например, только предположения о причинах отказа или о типе отказавшего элемента. Методика основана на количественной обработке экспертных суждений, проста в применении и дает оценку качества полученных результатов.

## Литература

1. Антонов А.В., Острейковский В.А. Оценивание характеристик надежности элементов и систем ЯЭУ комбинированными методами. – М.: Энергоатомиздат, 1993.
2. Волков Ю.В. Теоретико-расчетные модели для оценок и обеспечения надежности и безопасности реакторных установок // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 1995. – № 6.
3. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. – М.: Мир, 1976, 165с.
4. Zadeh L.A. Fuzzy sets // Information and control. – 1965. – V. 8.
5. Аверкин А.Н. и др. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта. – М.: Наука, 1986. – 312 с.
6. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М., 1976. – 280 с.
7. РД-03-113-94 №41: Положение по организации и проведению экспертизы проектных и других материалов и документации, обосновывающих безопасность ядерно- и радиационно опасных объектов (изделий) и производств (технологий)/Зарегистрировано в Минюсте РФ 18 апреля 1994 г. № 547.
8. Костерев В.В. Нечетко вероятностные модели в задачах анализа и оценки риска: Сб. научн. трудов Всероссийской конференции «Радиационная безопасность человека и окружающей среды». – М., 2002.
9. Алтунин А.Е., Семухин М.В. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях. – Тюмень: Тюменский государственный университет, 2002.
10. Волков Ю.В., Самохин Д.С., Антонов А.В., Чепурко В.А., Караулов И.К., Соколов С.В. Автоматизированная информационная система по показателям надежности оборудования и персонала ядерно опасных производств (АИСПНОП). Отчет о НИР. № гос. рег. 0120.0 507485/ИАТЭ. – Обнинск, 2004. – 44с.
11. Volkov Yu., Kochnov O. The experience of emergency shutdown of the VVR-c reactor after 40 years of operation/ Lambert F. and Volkov Yu. (eds) Safety Improvements through Lessons Learned from Operational Experience in Nuclear Research Facilities. Springer, 2006.

Поступила в редакцию 22.05.2006

## 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  $\alpha$ . 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.