

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ВЫБОРА НОВЫХ ТИПОВ РЕАКТОРОВ И ПЛОЩАДОК ИХ РАЗМЕЩЕНИЯ

В. Г. Батий, В. В. Деренговский

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев, Украина

В данной работе рассмотрено построение системы принятия решений на основе многокритериального анализа и системы экспертных оценок для выбора наиболее перспективных типов реакторов, а также при выборе площадок размещения радиационно-опасных объектов атомной энергетики.

Введение

Решение разнообразных вопросов, связанных с развитием атомной энергетики, таких как разработка и строительство новых энергоблоков, объектов для обращения с радиоактивными отходами (РАО), отработавшим ядерным топливом и т.д., делает актуальной задачу выбора проекта с минимальными затратами на разработку на наиболее раннем этапе выполнения проекта.

Цель работы – разработка системы поддержки принятия решений выбора новых типов реакторов и площадок их размещения на основе многокритериального анализа.

В данной работе представлена процедура принятия оптимальных решений для радиационно-опасных объектов (как для технологий создания новых реакторов, так и для мест их расположения) при недостаточности или недостоверности исходной информации. В настоящее время в Украине нет утвержденной методики сравнительного анализа различного типа реакторов и площадок их расположения. В связи с этим предлагается возможный вариант процедуры принятия приемлемого варианта.

При выборе наилучшего варианта приходится учитывать много различных требований, предъявляемых к решению, и среди них встречаются требования противоречащие друг другу. Однако почти все математические методы оптимизации предназначены для нахождения экстремума одной функции - для одной цели. Поэтому чаще всего пытаются свести многоцелевую задачу к одноцелевой. Эта процедура в большинстве случаев неприменима, так как выразить все критерии через одну цель практически невозможно.

Если при решении одноцелевых задач методологических проблем не возникает, а возможны только вычислительные трудности, то иначе обстоит дело с многоцелевыми решениями. Здесь основные нюансы связаны со следующей проблемой: что следует считать наилучшей альтернативой в задаче с несколькими целевыми функциями, которые противоречивы и достигают максимума в различных точках множества альтернатив? На этот счет на сегодняшний день не существует единого мнения, поэтому оценка качества системы в случае векторного показателя качества является одной из главных проблем в теории эффективности и исследования операций.

Многомерные цели могут находиться друг с другом в следующих отношениях:

1. Цели взаимно нейтральны. Система может независимо характеризоваться и рассматриваться применительно к отдельным целям.

2. Цели кооперируются. Здесь, как правило, систему удастся рассмотреть применительно к одной цели, а остальные достигаются одновременно.

3. Цели конкурируют. В этом случае одну из целей можно достигнуть лишь за счет другой.

Если цели частично нейтральны, частично кооперированы и частично конкурируют между собой, то задача формулируется таким образом, что нужно принимать во внимание только конкурирующие цели. Рассмотрение нейтральных или кооперативных целей не представляет особых трудностей, поэтому проблемы, ориентированные на множество целей, прежде всего, должны быть рассмотрены в части конкурирующих целей, поскольку все они вместе не могут быть выражены одномерным параметром.

Проведение многокритериального анализа позволяет получить количественные оценки предпочтительности выбора типа реактора и площадки его строительства и эксплуатации. Основой методики являются принципы, изложенные в работах [1, 3, 4].

Алгоритм принятия оптимального решения

Рассматриваемая методика предполагает анализ вариантов с целью выбора оптимального. При этом предпочтительность выбора не может быть охарактеризована единственным критерием. Следо-

вательно, задача выбора является многокритериальной. Необходимо отметить, что ряд критериев, используемых для выбора оптимального, не имеют выражения в денежном эквиваленте (например, коллективная доза населения, превышение предела доз и т.п.). В этой ситуации наиболее эффективным методом решения задачи выбора является многокритериальный анализ, который применяется в теории управления [3].

Для решения указанной задачи необходимо разработать методику принятия решения по выбору наиболее приемлемого варианта с соблюдением ограничений, перечисленных в нормативно-правовых актах, документах заказчика, технических спецификациях и др.

Суть метода многокритериального анализа функции желательности состоит во введении агрегированного критерия, в котором объединяются все другие критерии [3]. С этой целью для каждого критерия осуществляется построение функции желательности $u_j(x)$, которая отображает область изменения каждого из критериев x в диапазоне баллов, изменяющихся от 0 до 1.

Обобщенный показатель эффективности W_i i -го варианта определяется как сумма соответствующих функций желательности

$$W_i = \sum_{j=1}^n k_j u_j(x_{ji}) \quad (1)$$

с весовыми коэффициентами k_j , которые выбираются так, чтобы

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

Вид функций желательности u_j и значения весовых коэффициентов k_j выбираются в зависимости от исходных данных, проектных решений, принятых критериев и способов получения их численных значений, а также шкалы предпочтений выбранных критериев.

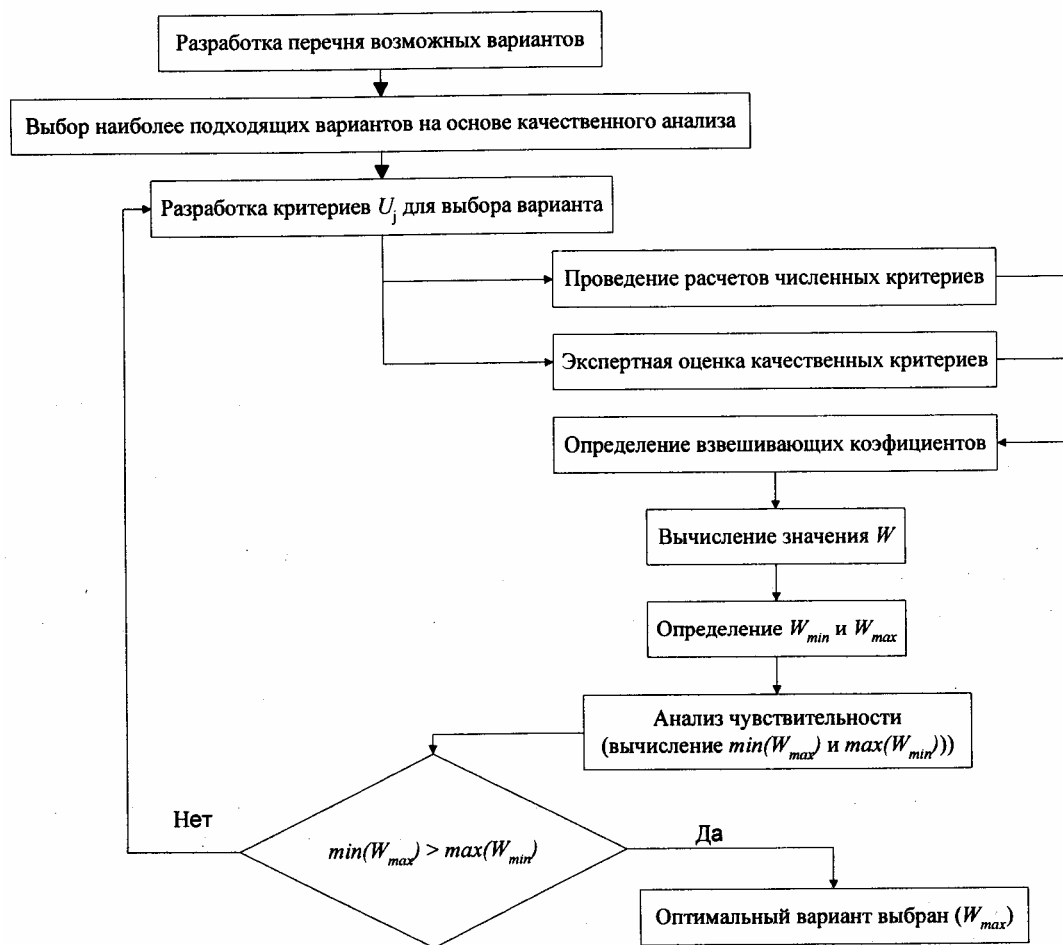


Рис. 1. Схема проведения выбора оптимального варианта.

Для решения поставленной задачи разработан следующий алгоритм принятия оптимального решения, представленный на рис. 1. Первым шагом данного алгоритма является разработка перечня возможных вариантов (шаг 1) и при помощи качественного анализа выбираются наиболее перспективные для последующего изучения (шаг 2). После этого уточняются критерии выбора варианта (шаг 3) и выполняются расчеты численных критериев с указанием границ изменения параметров (шаг 4). Для качественных критериев группой экспертов проводится оценка анализируемых вариантов с указанием границ изменения параметров (шаг 5) и определение весов каждого из критериев (шаг 6). Далее для каждого варианта вычисляется обобщенный показатель эффективности W_i (шаг 7), среди которых определяется максимальное значение W_{max} и ближайшее по величине значение обобщенного показателя эффективности W_{max-1} (максимальное из оставшихся значений) (шаг 8). Поскольку некоторые из критериев имеют оценочный характер, необходимо провести анализ чувствительности полученного выбора от вариации параметров в границах изменений (шаг 9), т.е. определить, не изменится ли выбор оптимального варианта при различных значениях параметров расчетов в пределах границ изменений. Далее определяется минимальное значение обобщенного показателя эффективности для оптимального варианта при вариации параметров $min(W_{max})$ и максимальное значение обобщенного показателя эффективности для ближайшего варианта при вариации параметров $max(W_{max-1})$. Если $min(W_{max}) > max(W_{max-1})$ (шаг 10), то полученный вариант будет оптимальным (шаг 11). Если же $min(W_{max}) \leq max(W_{max-1})$ (шаг 10), то либо все варианты равноценны между собой, либо необходимо провести повторную корректировку перечня критериев, уточнения границ изменения параметров, оценок качественных критериев и определение весов критериев.

Критерии оценки перспективности новых типов реакторов

На национальном уровне, за последние сорок лет (в сумме это составило свыше 10 реакторо/лет функционирования), различные группы экспертов разработали соответствующие документы с требованиями заказчика, которые поддержаны практическим опытом, начиная со стадии строительства, получения лицензии и эксплуатации АЭС. Документы под названием “Требования реакторной безопасности” были подготовлены по мере эволюции проектов и проектирования более модифицированных вариантов силами таких организаций как EPRI (Advanced Light Water Reactor Utility Requirements Document – ALWR-URD, требования энергосетей по усовершенствованному легководному реактору ALWR-URD), Japanese and Korean Utilities (JURD and KURD, требования электросетей Японии и Республики Корея JURD и KURD), а также европейских энергосистем (European Utility Requirements – EUR). Документы в значительной степени одобрены энергокомпаниями, эксплуатирующими электросети. Они имели свое происхождение от хорошо известных типов реакторов, которые отражают практику эксплуатации и сформированы на базе разработок и эволюции проектов. В сентябре 1997 г. МАГАТЭ представило экспертизу всех этих документов и суммировало суть данных требований следующим образом:

ресурсный срок 60 лет;

надежная и гибкая эксплуатация при высоком коэффициенте операционной готовности, низком уровне внеплановых остановов, краткосрочном периоде времени выхода на перегрузку, высокой регулируемости (например, последовательная реализация производительности 100 - 50 - 100 %) и рабочие циклы вплоть до продолжительности 24 мес;

повышенный запас надежности для снижения чувствительности в отношении помех и ряда определенных вызовов в отношении безопасности;

повышенная автоматизация процессов и узла сочленения “машина - человек”, который вместе с возросшими запасами по надежности предоставляет оператору большее время для осуществления действий в условиях аварий либо аварийных событий и, в то же время, понижает вероятность совершения ошибки оператором;

частота повреждаемости активной зоны реактора ниже 10^{-5} на реакторо/год, а кумулятивная частота крупного выброса в результате повреждения активной зоны реактора ниже 10^{-6} на реакторо/год; мероприятия конструктора, для того чтобы управлять тяжелыми авариями.

В отдельных случаях существуют региональные различия между европейскими требованиями и нормами США. Данное различие обуславливается тем обстоятельством, что более высокая плотность населения Европы выдвигает требования к более жестким контрольным цифрам по выбросам, а именно:

ограничить до минимума пределы аварийной защиты в районе 800 м около ядерного реактора в течение раннего выброса из-под защитной герметичной оболочки ядерного реактора;

избегать отложенных действий (временного перемещения групп населения) в любой момент времени за пределами 3 км от данного ядерного реактора;

избегать долгосрочных действий, сопряженных с постоянным (превышающим 1 год) отселением групп населения на любом расстоянии в пределах более 800 м от ядерного реактора;

обеспечить такую ситуацию, при которой ограничения на потребление продуктов питания и получаемого урожая будет ограничено как во времени, так и территорией.

Данные требования можно считать базовыми и использовать их на предварительном этапе рассмотрения вариантов. Все варианты, не удовлетворяющие данным требованиям, исключаются из дальнейшего рассмотрения. Все остальные варианты, удовлетворяющие базовым требованиям, сравниваются между собой по критериям, представленным в табл. 1.

Таблица 1. Перечень главных групп факторов, определяющих выбор новых типов реакторов

Группы факторов	Что рассматривается
Экономические	Стоимость ядерной энергии, период окупаемости установки, степень диверсификации поставок топлива, оборудования и др.
Радиоэкологические	Радиационная обстановка; радиационное воздействие на персонал и население при строительстве, нормальной эксплуатации и возможных авариях
Обращение с отходами	Время обращения с РАО, стоимость обращения с отходами, технологии обращения с РАО, места хранения и захоронения РАО
Физическая защита	Риск использования в военных целях, степень защищенности от несанкционированного доступа

Следующим шагом алгоритма необходимо определить критерии принятия оптимального варианта. Учитывая требования украинских и международных документов и рекомендаций по соблюдению принципа ALARA, предложены к рассмотрению следующие критерии принятия оптимального решения:

- 1) u_1 – стоимость ядерной энергии, грн/кВт.;
- 2) u_2 – период окупаемости установки, лет;
- 3) u_3 – степень энергетической независимости;
- 4) u_4 – радиационный риск при нормальной эксплуатации и возможных авариях;
- 5) u_5 – степень надежности реактора;
- 6) u_6 – время обращения с отходами, лет;
- 7) u_7 – стоимость обращения с отходами, грн;
- 8) u_8 – степень физзащиты.

Все перечисленные критерии в зависимости от степени проработки проектных решений, полноты и достоверности исходных данных могут быть рассчитаны с известной относительной погрешностью. При отсутствии полноты и/или достоверности исходных данных, а также недостаточной детальности проработки проектных решений при помощи экспертных систем, проводится оценка необходимых данных. При этом соответствующие критерии будут иметь оценочные значения с указанием относительной погрешности или закона распределения. Кроме того, в общем случае все критерии могут быть как количественными, так и качественными. Чаще всего качественными являются критерии, оцененные при помощи экспертных систем.

Рассмотрим детальнее выбранные основные критерии. В большинстве случаев критерии u_1 , u_2 , u_4 , u_6 , и u_7 являются количественными. Критерии u_3 , u_5 , и u_8 в большинстве случаев являются качественными. Для вычисления величины качественных критериев необходимо воспользоваться системой экспертных оценок – методом непосредственного оценивания (этот метод описан ниже).

Критерии выбора площадки размещения новых реакторов

Для проведения оценки площадок строительства объекта, прежде всего, необходимо определить общие аспекты, которые влияют на выбор площадки. Эти общие аспекты приведены в табл. 2.

Определим критерии принятия оптимального варианта. Учитывая требования украинских и международных документов и рекомендаций по соблюдению принципа ALARA, предложены к рассмотрению следующие критерии принятия оптимального решения:

- 1) u_1 - численность населения в районе площадки, чел.;
- 2) u_2 - доза облучения персонала и населения, мЗв;
- 3) u_3 - превышение плотности радиоактивного загрязнения территории, %;

Таблица 2. Перечень главных групп факторов, определяющих выбор площадки

Группы факторов	Что рассматривается
Радиоэкологические	Радиационная обстановка; радиационное воздействие на персонал и население при строительстве, нормальной эксплуатации и возможных авариях
Социальные	Плотность населения; образование новых рабочих мест; общественное мнение и др.
Природно-климатические	Наличие эндо- и экзогенных геологических процессов; сейсмичность территории; густота и расположение гидрографической сети; вероятность подтопления и затопления; глубина залегания грунтовых вод и др.
Природоохранные	Наличие и значимость объектов природно-заповедного фонда; потребность в проведении восстановительных и компенсационных мероприятий по минимизации воздействий

- 4) u_4 - количество объектов природно-заповедного фонда, ед.;
- 5) u_5 - количество редких и охраняемых видов, ед.;
- 6) u_6 - объекты гидрографической сети, км²;
- 7) u_7 - количество опасных объектов в 5-километровой зоне объекта, ед.;
- 8) u_8 - наличие природных факторов, влияющих на безопасность эксплуатации объекта;
- 9) u_9 - необходимость отвода земли;
- 10) u_{10} - необходимость создания подъездных путей;
- 11) u_{11} - направленность общественного мнения.

Рассмотрим детальнее выбранные основные критерии. В большинстве случаев первые семь критериев являются количественными. Критерии с восьмого по одиннадцатый в большинстве случаев являются качественными. Для вычисления величины качественных критериев необходимо воспользоваться системой экспертных оценок – методом непосредственного оценивания.

Метод непосредственного оценивания

Метод непосредственного оценивания – наиболее распространенный метод в практике принятия решений. Он позволяет эксперту использовать более чувствительный инструмент взаимного сравнения вариантов. При использовании этого метода перед экспертом ставится задача – оценить качественное свойство критерийного показателя в баллах (предварительно устанавливается диапазон изменений этой оценки). Эксперты должны отображать степень соответствия варианта рассматриваемому свойству. Баллы – это штучные числовые оценки качественного свойства.

Все множество оценок экспертами одного варианта решения $\{B_i^l\}$, $l=1, m, l=1, L$, определенных разными специалистами, можно отобразить на соответствующей шкале. На рис. 2 приведен пример размещения оценок варианта по свойству L , который определен 12 экспертами.

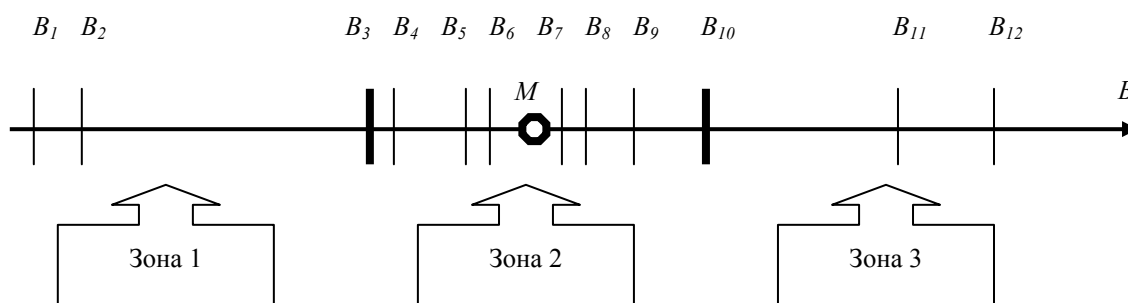


Рис. 2. Шкала оценок экспертов.

Сначала необходимо определиться с допустимостью уровня расхождений оценок экспертов, которые находятся в диапазоне $B_1 - B_{12}$. Если эксперт считает ее допустимой, то в качестве общей оценки (результат обработки мнений экспертов) может быть использовано среднее значение $B_{сред}$ или медианное значение M .

$$B_{\text{сред}} = \frac{\sum_{i=1}^m B_i}{m}, \quad (3)$$

где B_i - значение показаний в оценке i -го эксперта.

Все ответы экспертов в порядке возрастания их значений располагают на общей шкале и определяют зону оптимизма (зона 3), зону пессимизма (зона 1) и зону средних оценок (зона 2). К зоне 1 и зоне 2 относят по $\frac{1}{4}$ выставленных оценок. Медиана M определяется для средней зоны оценок.

Необходимым условием достоверности полученной оценки является достаточный уровень согласованности мнений экспертов. Его проверяют на основе анализа дисперсии оценок промежутка между $B_{i1} - B_{i2}$. Если эксперт считает неприемлемым степень расхождения выставленных оценок, то авторам оценок из зоны 1 и зоны 3 предлагается аргументировать свою точку зрения. Это может быть проведено в письменном виде или на основании совместного обсуждения результатов. После этого процедура экспертного оценивания повторяется.

Наилучший вариант решения будет удовлетворять условию:

$$\max_j \{B_{j_{\text{сред}}}\} \text{ или } \max_j \{M_j\}, \quad (4)$$

где M_j – медиана оценок экспертами j -го варианта решений.

Для выбора наилучшего варианта предложен путь поиска решения, который базируется на аппарате размытых множеств [2, 5]. Известная в теории размытых множеств функция принадлежности U_{jA_l} дает оценку в интервале $[0, 1]$, что характеризует степень принадлежности некоторого элемента j (в нашем случае варианта решения) некоторому подмножеству A_l (в нашем случае это означает существование у варианта решения соответствующего свойства l).

Если задана группа свойств $\{l\}$, $l = 1, L$ и необходимо выбрать вариант, который наилучшим образом отвечает всем свойствам одновременно, тогда может быть предложено некоторое глобальное свойство A , которое будет иметь вид

$$A = \bigcap_{l=1}^L A_l.$$

Функция принадлежности пересечения разных множеств определяется как

$$U_A = \begin{cases} \min_j U_{jA} & \text{— при минимизации } U_A \\ \max_j U_{jA} & \text{— при максимизации } U_A, \end{cases} \quad (5)$$

где U_{jA} - степень соответствия свойствам каждого варианта решений.

Тогда наилучший вариант решения будет тот, который отвечает условию (5). Величина U_{jA} может быть определена следующим образом:

$$U_{jA} = \begin{cases} \min_l U_{jA_l}, 1 \leq l \leq L & \text{— при минимизации } U_A \\ \max_l U_{jA_l}, 1 \leq l \leq L & \text{— при максимизации } U_A. \end{cases} \quad (6)$$

Выражение (5) отвечает известному в теории размытых множеств принципу гарантированного результата, который определяется максиминным (минимаксным) решением.

Построение наиболее приемлемых функций желательности

Перейдем теперь к построению функций желательности для выбранных критериев. Сначала надо определить, какие критерии являются количественными, а какие - качественными. Следующим шагом является определение границ значений количественных критериев. Учитывая физический смысл критериев, нижней границей для всех количественных критериев будет нулевое значение. Максимальное значение этих критериев может быть как исходными данными, так и экспертными оценками.

В некоторых случаях получить эти значения не представляется возможным. Определим теперь монотонность и склонность/несклонность или безразличие к риску функций для указанных критериев. Исходя из определений критериев, все они являются монотонно убывающими, поскольку чем меньше значение критерия, тем лучше соответствующее решение. Проанализировав принцип ALARA и выбранные критерии, можно сделать следующий вывод: все критерии не склонны или безразличны к риску.

На следующем этапе построения функций желательности необходимо определить численные значения этих функций для граничных значений количественных критериев. Учитывая все выше сказанное, получим:

$$u(x_{\min}) = u(0) = 1,$$

$$u(x_{\max}) = 0.$$

Для тех случаев, когда верхняя граница критерия не определена, функция желательности будет асимптотически приближаться к оси значений критериев. Следующими шагами построения функций желательности является определение значений функций $U(x_{0,5})$, $U(x_{0,25})$ и $U(x_{0,75})$ в точках $x_{0,5} = (x_{\max} - x_{\min})/2$, $x_{0,25} = (x_{\max} - x_{\min})/4$ и $x_{0,75} = 3 \cdot (x_{\max} - x_{\min})/4$.

После проверки согласованности полученных значений можно перейти к графическому представлению полученных функций желательности.

Для построения функции желательности для всех количественных критериев предложены следующие варианты:

1. для монотонно убывающих, безразличных к риску и имеющих границу сверху критериев - простые линейные функции вида

$$u_i = A \cdot X + B, \quad (3)$$

где $i = 1, \dots, 7$; X - значение критерия.

Графическое представление указанных выше функций желательности показано на рис. 3;

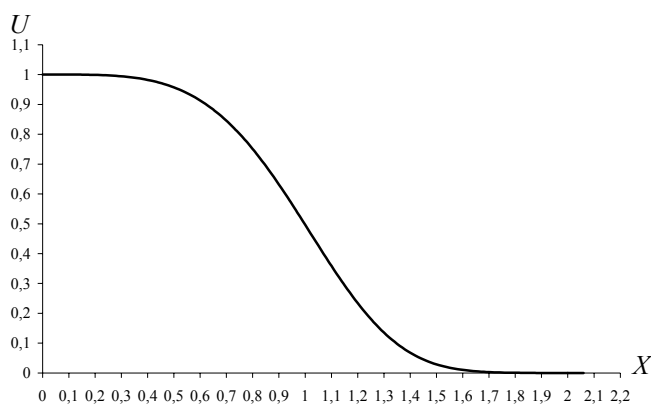


Рис. 3. Вид функции желательности u для критериев, не имеющих верхней границы значений.

2) когда установить верхнюю границу значения критерия не представляется возможным и для некоторых случаев построения функции желательности всех количественных критериев необходимо выполнение следующих условий:

в области малых значений стоимости и дозы функция должна иметь высокие значения и быть малочувствительной к изменениям аргумента;

в области больших значений стоимости и дозы функция должна иметь низкие значения и быть малочувствительной к изменениям аргумента;

в интервале близких значений аргумента функция должна иметь хорошее разрешение.

Вышеперечисленным условиям соответствует функция

$$u_i = EXP(-0,7 \cdot (X/A)^4), \quad (4)$$

где $i = 1, \dots, 7$, X - значение критерия; A - константа, определяемая как среднее значение i -го критерия всех рассматриваемых вариантов.

Графическое представление указанных выше функций желательности показано на рис. 4.

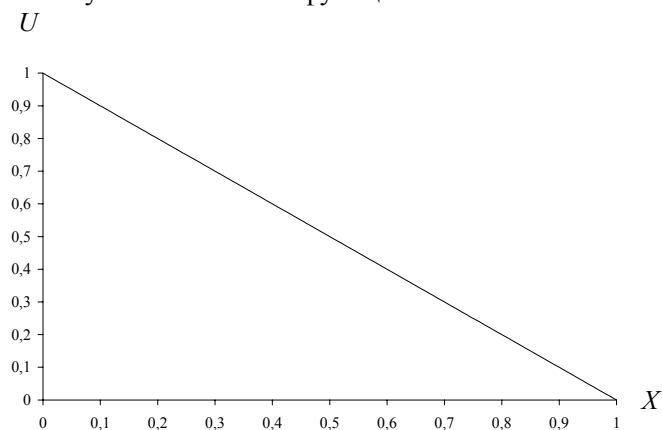


Рис. 4. Вид функции желательности u к риску критериев.

Функцию желательности для качественных критериев можно определить следующим образом ($i = 1, \dots, 7$): $u_i(9) = 0$; $u_i(8) = 0,125$; $u_i(7) = 0,25$; $u_i(6) = 0,375$; $u_i(5) = 0,5$; $u_i(4) = 0,625$; $u_i(3) = 0,75$; $u_i(2) = 0,875$; $u_i(1) = 1$.

График такой функции желательности имеет дискретный характер, так как функция определена только в девяти точках (рис. 5).

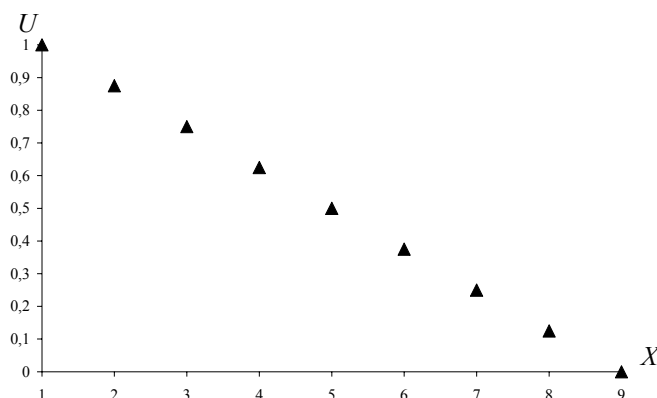


Рис. 5. Вид функции желательности u для качественных критериев.

Заключение

Использование данного метода позволяет без существенных финансовых затрат оценить возможные выгоды от внедрения новых типов реакторов и определить приемлемые площадки расположения объектов атомной энергетики в условиях недостаточности исходных данных, а также на ранних стадиях разработки проектов.

Предложенная многокритериальная система поддержки принятия решений была успешно применена при выборе площадки размещения ХОЯТ ВВЭР [6] и подготовке проекта реализации стабилизационных мероприятий на объекте «Укрытие» в рамках ПОМ.

Использование данного метода позволяет в условиях недостаточности исходных данных проводить анализ и сравнение вариантов для:

- строительства новых энергоблоков;
- создания объектов для обращения с РАО и отработавшим ядерным топливом;
- снятия АЭС с эксплуатации и/или продление сроков их эксплуатации;
- других работ, у которых несколько критериев оценки и они не могут сравниваться в исходном виде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

2. Кини Р., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения / Пер. с англ. - М.: Радио и связь, 1981. - 560 с.
3. Уотермен Д. Руководство по экспертным системам / Пер. с англ. - М.: Мир, 1989. - 388 с.

4. *Форсайт Р.* Экспертные системы. Принцип работы и примеры / Пер. с англ. -М.: Радио и связь, 1987. – 224 с.
5. *Кини Р.* Размещение энергетических объектов: выбор решений / Пер. с англ. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 318 с.
6. *Саати Т.* Принятие решений. Метод анализа иерархий. - М.: Радио и связь, 1993.
7. *Батий В.Г., Городецкий Д.В., Деренговский В.В. и др.* Выбор площадки для строительства централизованного хранилища отработавшего ядерного топлива // Проблемы Чернобиля. - 2003. - Вып. 13. - С. 24.

MULTICRITERIA SYSTEM OF SUPPORT OF A DECISION MAKING OF THE CHOICE OF NEW TYPES OF REACTORS AND SITES OF THEIR LOCATION

V. G. Batiy, V. V. Derenkovskyu

In this work the construction of system for a decision making on the basis of the multicriteria analysis and a system of expert estimations for choice the most promising types of reactors so as a choice of site of location the radioactive hazardous objects of atomic energetic.

БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНА СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ВИБОРУ НОВИХ ТИПІВ РЕАКТОРІВ І МАЙДАНЧИКІВ ЇХ РОЗМІЩЕННЯ

В. Г. Батій, В. В. Деренговський

У даній роботі розглянута побудова системи прийняття рішень на основі багатокритеріального аналізу і системи експертних оцінок для вибору найбільш перспективних типів реакторів, а також при виборі майданчиків розміщення радіаційно-небезпечних об'єктів атомної енергетики.