

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 39 страницы, 8 таблиц, 9 рисунков. Список использованных источников содержит 16 позиций.

### РЕЙТИНГ КОМПАНИЙ, СПЕЦИАЛИЗИРУЮЩИХСЯ НА РАЗРАБОТКАХ В ОБЛАСТИ СТРУКТУРНОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

Выпускная квалификационная работа рассматривает комбинированные математические модели для формирования рейтинга компаний, занимающихся разработкой композиционных материалов, работающих в IT или в других сферах. Предложенную комбинированную математическую модель можно использовать и для ранжировки других объектов. В данной работе рассмотрены несколько математических моделей построения ранжировки — скалярное ранжирование с помощью четырех функции скаляризации:

1. Аддитивная функция скаляризации или взвешенная сумма
2. Мультипликативная функция скаляризации или взвешенное произведение
3. Каноническая аддитивно-мультипликативная функция скаляризации
4. Энтропийная функция скаляризации

На основе функций 1 — 4 строится *агрегированная ранжировка* методом строчных сумм. Предложен визуальный, вспомогательный способ получения корректных весов для критериев и сравнения критериев между собой. Также в работе рассматривается метод сравнения вариантов, связанный с попарным сравнением вариантов и более известный как турнирный метод.

В рамках данной работы создан программный продукт, реализующий функции скаляризации и агрегирующий результаты, сравнительный метод

для попарного сравнения и ранжировки, а также метод определения и сравнения весов. Полученные методы ранжировки применены к формированию рейтинга нескольких компаний, специализирующихся на разработках в области структурного материаловедения.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	6
1.1 Скалярное ранжирование и функция полезности.....	7
1.2 Аддитивная функция скаляризации или взвешенная сумма.....	9
1.3 Мультипликативная функция скаляризации.....	10
1.4 Каноническая аддитивно-мультипликативная функция скаляризации..	10
1.5 Энтропийная функция скаляризации.....	11
1.6 Агрегированная ранжировка.....	11
1.7 Метод попарных сравнений.....	12
1.8 Методы определения весов критериев.....	13
1.9 Визуальный способ задания весов.....	15
1.9.1 Уточнение некоторых терминов.....	18
1.9.2 Генерация критериев и сбор данных для ранжирования.....	19
1.9.3 Шкалы для критериев.....	21
1.9.4 Формирование рейтинга.....	21
1.9.5 Типичные ошибки .....	29
2. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	30
2.1 Реализация метода.....	31
3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	36
3.1 Вывод.....	37
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	38

## ВВЕДЕНИЕ

Практический каждый день каждому из нас приходится сравнивать, оценивать, делать выбор или упорядочивать разные объекты. В повседневной жизни мы, как правило, знаем и можем достаточно быстро определиться, сопоставить и оценить ситуацию почти мгновенно. Для повседневных простых задач, как правило, это не сложно. Можно действовать вообще по готовым «шаблонам», быстро сравнивая разные объекты, например, товары в магазине. Более масштабные объекты, такие как большие компании, которые занимаются разработкой сложных, композиционных материалов, работают в ИТ или в других сферах, требуют более тщательного анализа и взвешивания для сопоставления, упорядочивания и построения рейтингов. Возникает необходимость консультироваться, учитывать мнения экспертов, аналитиков и в реалиях современного мира, необходимость использовать информационные технологии, вычислительные системы, эффективные методы определения весов и сравнения критериев. Использование нескольких математических моделей позволяет сопоставить, ранжировать такие сложные объекты, дает возможность сделать правильный и обоснованный выбор. Как в большинстве других сфер, использование сразу нескольких моделей ранжирования дает прекрасную возможность оценить объект с разных сторон, позволяет сравнить результаты каждой математической модели, добавляет полноту и ясность. Такой подход также дает возможность дополнить или «редактировать» критерий или веса для этих критериев, позволяет оценить «контрастность» и определить порядок предпочтений. В работе используется несколько моделей для определения рейтингов: мультипликативная функция скаляризации или взвешенное произведение, аддитивная функция скаляризации или взвешенная сумма, каноническая аддитивно-мультипликативная функция, энтропийная функция скаляризации а также

дополнительный сравнительный способ, – парное сравнение (метод турнирного выбора). На основе ранжировок скалярных функций, строится агрегированная ранжировка методом строчных сумм. Полученные результаты комбинированной математической модели не зависят от конкретного порядка использования разных методов, т. е. можно сортировать их в любом порядке. Также надо отметить, что количество моделей можно менять или дополнять, если будет такая необходимость в дальнейшем. Предложенный способ позволяет корректно оценить веса для критериев на этапе ввода и после сравнить и ранжировать их в квадратной таблице.

Работа изначально посвящена ранжированию компаний специализирующихся на разработках в области структурного материаловедения, в разработках принципиально новых материалов, нанотехнологии, программных продуктов для моделирования подобных структур, новых материи и т. д.

Критерии для ранжирования таких компаний касаются в основном научной стороны их деятельности. Практическая выражается в успешном коммерческом реализации принципиально нового материала или продукта с использованием этого материала.

## 1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

## 1.1 Скалярное ранжирование

*Ранжирование* – несложный способ сравнения вариантов – это оценивание их в ранговой шкале. Для человека вариант воспринимается как целый образ, без детализации отдельно взятых частей этого целого. У этого феномена есть своё название в психологии, — гештальт. Ранжирование вариантов подразумевает представление вариантов в виде последовательности в соответствии с убыванием их предпочтительности. Ранжирование называется *нестрогим*, если допускается указание на равноценность соседних вариантов, и *строгим* в противном случае.

Ранговая шкала это порядковая шкала, и, как правило, значения этой шкалы – целые числа, эквидистантные друг от друга. *Рангом* варианта называют оценки по ранговой шкале.

Другой способ сравнения вариантов – попарное сравнение. *Попарное сравнение* вариантов также проводится в целом и состоит в указании более предпочтительного варианта при сравнении каждой пары вариантов, либо в указании их равноценности (безразличия) или несравнимости.

Измерения проводятся в порядковой шкале. Результаты парного сравнения вариантов  $a_1, a_2, \dots, a_n$  удобно представлять в виде матрицы парных сравнений  $A = \|\alpha_{ij}\|$   $i, j = 1, \dots, n$ , например, следующего вида :

$\alpha_{ij} =$	1, если $a_i$ предпочтительнее, чем $a_j$
	1/2, если $a_i$ и $a_j$ равноценны
	0, если $a_j$ предпочтительнее, чем $a_i$

или, когда все варианты сравнимы, с элементами :

$\alpha_{ij} =$		2, если $a_i$ предпочтительнее, чем $a_j$
		1, если $a_i$ и $a_j$ равноценны
		0, если $a_j$ предпочтительнее, чем $a_i$

Попарное сравнение и ранжирование являются частными случаями представления предпочтения бинарными отношениями. Бинарное отношение формируется на множестве вариантов в случае, когда предпочтения эксперта описываются парными сравнениями. Так как оно может быть нетранзитивным, считается, что парное сравнение проще проводить, чем сформировать ранжирование.

*Скалярная ранжировка* превращает оценки  $i$ -го объекта, по  $j$ -у критерию в скалярное значение. Метод скалярного ранжирования позволяет решать мультикритериальные задачи принятия решений. Существуют разные виды функций скаляризации. Вот некоторые из них:

- Аддитивная функция скаляризации или взвешенная сумма
  - Мультипликативная функция скаляризации или взвешенное произведение
  - Каноническая аддитивно-мультипликативная функция скаляризации
  - Энтропийная функция скаляризации
  - Аддитивно-мультипликативная функция скаляризации на основе ряда Виннера
- и т. д.

В данной работе мы будем использовать первые четыре функции скаляризации: «аддитивную», «мультипликативную», «каноническую аддитивно-мультипликативную», «энтропийную». После получения результатов по всем методам (т. е. функциями скаляризации 1—4) строится ещё и агрегированная, конечная ранжировка *участников* методом строчных сумм. Веса критериев определяются при помощи визуальных вспомогательных средств .

Комбинированный метод ранжировки, предложенный в данной работе включает ещё один, дополнительный метод для сравнения вариантов — парное сравнение (более известное как турнирный выбор), где в квадратной матрице критериев сравниваются все объекты друг с другом по различным критериям. Полученные результаты для каждого *объекта-участника* отдельно и построчно суммируются. Надо отметить и подчеркнуть еще раз, что этот метод используется в данной работе отдельно от всех остальных методов как добавочный метод для сравнения с результатами функции скаляризации 1.1 — 1.4, и не агрегируется с ними в единый ранжированный результат.

### **1.2 Аддитивная функция скаляризации, или взвешенная сумма**

Данный вид функции скаляризации, или взвешенная сумма, выражает принцип равномерной оптимизации. Частные критерии в таком методе выражены в одних единицах, имеется свойство компенсировать низкую оценку по одному критерию высокой оценкой по другому:

$$F_1 = \sum_{i=1}^j x_{ij} * w_j \quad (1.1)$$

где  $j$  — количество частных критериев;  $w_i$  — коэффициент важности (вес) частного критерия; — оценка  $i$ -го участника или объекта, по  $j$ -у критерию

(берется из исходных данных, см. 1.9.2). Данная модель показывает вес участника на основе суммы всех критериев.

### 1.3 Мультипликативная функция скаляризации, или взвешенное произведение

Этот метод скаляризации, или взвешенное произведение, выражает принцип справедливого компромисса, низкая оценка даже по одному критерию означает низкое значение функции полезности, и общая ценность варианта будет равна нулю, если значение какого-либо критерия равна нулю:

$$F_2 = \prod_{i=1}^j x_{ij}^{w_i} \quad (1.2)$$

где  $j$  — количество частных критериев;  $w_i$  — коэффициент важности (вес) частного критерия;  $x_{ij}$  — оценка  $i$ -го участника или объекта, по  $j$ -у критерию (берется из исходных данных, см. 1.9.2). Данная модель оценивает «качественную стабильность» участника по всем критериям и показывает «дисбаланс».

### 1.4 Каноническая аддитивно-мультипликативная функция скаляризации

Этот метод скаляризации, как видно по формуле и по названию, является комбинированной версией двух предыдущих — аддитивной и мультипликативной функции скаляризации с добавлением специального — адаптационного параметра  $\beta$  (значение которого вводит эксперт).

$$F_3 = \beta \sum_{i=1}^j x_{ij} * w_j + (1 - \beta) \prod_{i=1}^j x_{ij}^{w_j} \quad (1.3)$$

где  $j$  — количество частных критериев;  $w_i$  — коэффициент важности (вес) частного критерия;  $x_{ij}$  — оценка  $i$ -го участника или объекта, по  $j$ -у критерию (берется из исходных данных, см. 1.9.2),  $\beta$  — адаптационный параметр  $0 \leq \beta \leq 1$ , определяет степень доверия к эксперту.

### 1.5 Энтропийная функция скаляризации

Энтропийная функция скаляризации имеет следующий вид:

$$F_4 = \sum_{i=1}^j w_j * x_{ij}^{w_j} \quad (1.4)$$

где  $j$  — количество частных критериев;  $w_i$  — коэффициент важности или вес частного критерия;  $x_{ij}$  — оценка  $i$ -го участника или объекта, по  $j$ -у критерию (берется из исходных данных, см. 1.9.2).

### 1.6 Агрегированная ранжировка

После ранжирования вышеуказанными методами, на основе функций 1.1 — 1.4, строится *агрегированная ранжировка* методом строчных сумм. При помощи *агрегированная* делается анализ чувствительности влияния каждого конкретного критерия на агрегированную ранжировку и позволяет определить ее устойчивость.

$$F_5 = \sum_{i=1}^{j=4} F_i \quad (1.5)$$

## 1.7 Метод попарных сравнений

В методе попарных сравнений объекты представляется квадратной матрицей:

$$S = (s_{ij})_{n \times n}$$

где объекты представлены в первой левой столбце, и в первой верхней строке. Элементы  $(s_{ij}, i, j = 1 \dots n)$  на пересечении  $i$ -й строки  $j$ -го столбца есть результаты экспертного попарного сравнения:

$s_{ij} =$	2, если $s_i$ предпочтительнее, чем $s_j$
	1, если $s_i$ и $s_j$ равноценны
	0, если $s_j$ предпочтительнее, чем $s_i$

Значения элементов матрицы суммируются, но не добавляются к строчным суммам предыдущих (т. е. скалярных) функции или к агрегированным результатам этих скалярных функции. Этот метод в данной работе используется как добавочный метод для сравнения его результатов с результатами скалярных функции F1 — F4.

Матрица  $S$  задает на множестве  $X^a$  бинарное отношение  $R$ , которое определяется следующим условием[2]:

$$x_i R x_j \Leftrightarrow s_{ij} > s_{ji}, \text{ где } x_i \neq x_j$$

предпочтительность определяется с помощью следующей формулы:

$$S(x_i) = \sum_j s_{ij}, \quad x_i \geq x_j \Leftrightarrow S(x_i) \geq S(x_j), \quad i, j = 1, \dots, m.$$

$$C_s(X) = \left\{ y \in X \mid S(y) = \max_{x \in X} S(x) \right\}.$$

## 1.8 Методы определения весов критериев

Приведем краткое описание известных методов определения весов критериев и сравнения вариантов [1][2][5][9][10][11][12][13][16].

**Прямой рейтинг.** Стандартный метод для оценки весов критериев, путем запроса заинтересованных сторон о присвоении числовых значений различным критериям.

**SWING.** Весовой коэффициент колебания учитывает уровни критериев при оценке весов критериев. Лица, принимающие решение (ЛПР) начинают с гипотетического наихудшего сценария, когда все критерии установлены на наихудших возможных уровнях. Затем они определяют наиболее важный критерий выбирая тот, который в случае улучшения улучшит общую ситуацию. Самому важному критерию присваивается 100 баллов, а затем ЛПР спрашивают о следующем критерии, который будет перемещен с наихудшего уровня в наилучший и который получит значение меньше сто баллов.

**SMART** (Simple Multiattribute Rating Technique ). Определение веса проводится в два этапа во время которых сначала устанавливается порядок важности критериев. Затем, начиная с наименее важного критерия, заинтересованные стороны оценивают относительную важность следующего критерия по сравнению с ранее оцененным критерием, присваивая ему балл более высокий, чем балл, присвоенный предыдущему. Наконец, эти веса нормализуют, чтобы их сумма была равна 1, или 100%. Методы SMART и **SWing** также можно комбинировать, используя последний метод для определения порядка важности критериев.

**АНР** (Analytic Hierarchy Process). При проведении оценки с использованием АНР проблема решения описывается в иерархической многоуровневой структуре. Цель располагается на верхнем уровне, критерии и подкритерии расположены на средних уровнях, а альтернативы - на самом низком уровне.

Эта структура пытается осмыслить причинно-следственные связи касающиеся того, как использование различных альтернатив может способствовать достижению главной цели. Веса критериев устанавливаются на основе парных сравнений. Парные сравнения используются на каждом уровне, чтобы обеспечить оценки весов для критериев, а также для альтернатив, что приводит к формированию матрицы предпочтений. Веса критериев определяются значениями главного собственного вектора этой матрицы. Согласованность суждений экспертов определяется путём определения коэффициента согласованности.

**MACBETH** (Measuring Attractiveness By a Categorical Based Evaluation Technique). Метод также основан на парных сравнениях значений критериев. Используется программное обеспечение M-MACBETH, необходимое для проведения анализа с помощью этого метода и поиска несоответствий в полученной матрице суждений. Затем программное обеспечение идентифицирует минимальное количество суждений, которые должны быть изменены для обеспечения согласованности, и предоставляет предложения для лиц, принимающих решения.

**DCE** (Discrete Choice Experiments). Если метод основан на принципах DCE, предпочтения ЛПР будут заданы только косвенно, с использованием указанных предпочтений. Так называемые наборы выбора создаются, когда лица, принимающие решения, сталкиваются с двумя гипотетическими сценариями, которые имеют явно определенные атрибуты в соответствии с различными критериями. Как правило, ЛПР должны выбрать более предпочтительный из двух наборов вариантов, иногда также с возможностью выбрать «ни один». На основании их выбора, их неявные предпочтения будут выявлены статистическими методами. Эти методы обычно требуют поддержки программного обеспечения.

**PAPRIKA** (Potentially All Pairwise Rankings of all Possible Alternatives). Методология может рассматриваться как методология DCE следующего

поколения. В этом случае ЛПР должны также выбирать между двумя наборами выбора. Во время этого процесса компьютерное программное обеспечение поддерживает уменьшение числа вопросов, на которые нужно ответить, предполагая транзитивность, и исключает парные сравнения на основе доминирования. Примером доминирования является ситуация, когда одна альтернатива имеет более высокий рейтинг по крайней мере по одному критерию и ни один не ниже по любому другому критерию по сравнению с другой конкурирующей альтернативой. Метод PAPRIKA также предоставляет информацию о предпочтительных функциях оценки, в соответствии с которыми альтернативы будут оцениваться по каждому критерию.

**СА (Conjoint Analysis).** Гибрид адаптивного СА - это тип совместного анализа, в котором лица, принимающие решения, занимаются ранжированием критериев перед парным сравнением. Этот метод, благодаря поддержке программного обеспечения, может использоваться для учета большего количества атрибутов и уровней простых функций оценки, чем с другими типами СА. При использовании этого метода учитывается готовность ЛПР обменять один атрибут на другой, а также их готовность платить в случае критерия стоимости.

### **1.9 Визуальный способ задания весов**

В описанных выше методах (см. 1.8), ЛПР должен определить веса критериев, количественно или качественно (вербально) описать их. Однако это достаточно сложно сделать.

Одним из возможных способов определения весов критериев является использование результатов оценок объектов по критериям, которые формирует Эксперт в виде таблицы *объект\*критерий*.

Таблица 1.1. *Объект\*критерий*.

Объекты	K_1	K_2	...	K_n
А	X <sub>11</sub>	X <sub>12</sub>	...	X <sub>1n</sub>
Б	X <sub>21</sub>	X <sub>22</sub>	...	X <sub>2n</sub>
...	...	...	...	...
... n	X <sub>n1</sub>	X <sub>n2</sub>	...	X <sub>nm</sub>

Здесь через  $K_j$  обозначен  $j$ -й критерий,  $x_{ij}$  — оценка  $i$ -го объекта по  $j$ -му критерию.

В данной работе сделана попытка дать Эксперту, ЛПР более комфортный способ для определения весов. Суть метода заключается в использовании «визуальных помощников» или средств (например, слайдер и т. д. Рис. 1.1, 1.2) для определения и/или регулировки весов, причем слайдер не показывает значения чисел или градаций, не мешая восприятию ЛПР. При реализации метода программа считывает эти данные в фоновом режиме. Веса в первый раз задаются на этапе ввода критериев, как показано на Рис.1.1, нормализуются, и второй раз считываются из матрицы парных сравнений критериев, как показано на Рис.1.2, так же нормализуются. Окончательная оценка весов для критериев формируются путем умножения вектора строчных сумм на вектор весов, предложенный экспертом.

The interface consists of a vertical list of criteria on the left and a set of sliders on the right. The criteria are: Новые разработки, Патенты, Прототипы, Области специализации, Студенты практиканты, Научные публикации, Опыт, Области применения, Собственные лаборатории, and Экология. Each criterion has a horizontal slider to its right, with a circular knob indicating the weight value.

Рис. 1. 1. Интерфейс для ввода и задания весов для критериев при помощи слайдера.

Создать таблицу для критериев

	Новые разработки	Патенты	Прототипы	Области специализации	Студенты практиканты	Научные публикации	Опыт	Области применения	Собственные лаборатории	
Новые разработки	<input type="range"/>									
Патенты	<input type="range"/>									
Прототипы	<input type="range"/>									
Области специализации	<input type="range"/>									
Студенты практиканты	<input type="range"/>									
Научные публикации	<input type="range"/>									
Опыт	<input type="range"/>									
Области применения	<input type="range"/>									
Собственные лаборатории	<input type="range"/>									
Экология	<input type="range"/>	<input type="range"/>								

Рис. 1.2. Матрица парных сравнений критериев .

### 1.9.1 Уточнение некоторых терминов

*Агентство* (или *рейтинговое агентство*) — агентство или предприятие, которое управляет и осуществляет рейтинговые проекты - собирает нужные данные и на основе этих данных строит рейтинг, используя конкретную методику.

*Данные* (или *исходные данные*) — перечень данных, характеризующие специальные аспекты профессиональной деятельности участника (компания или объект), которые представляются Агентству в конце *периода*, на основе которых строится рейтинг (за конкретный *период*).

*Период* — конкретный промежуток времени, в течение которого собираются данные или строится рейтинг.

*Ранг* — целое число, определяющее место или "качество" объекта в упорядочении. *Рангом* варианта называют оценки по ранговой шкале.

*Рейтинг* (или *Рейтинг-лист*) — список объектов участников, упорядоченных по возрастанию номера ранга.

*Ранжирование* — простой способ для сравнения вариантов – это оценивание в *ранговой шкале*. Ранжирование называется *нестрогим*, если допускается указание на равноценность соседних вариантов; и *строгим* в противном случае.

*Ранговая шкала* — порядковая шкала, как правило, значения этой шкалы — целые числа, эквидистантные друг от друга.

*Скалярная ранжировка* — ранжировка, которая превращает оценки  $i$ -го объекта, по  $j$ -у критерию в *скалярное значение*.

Метод *скалярного ранжирования* позволяет решать многокритериальные задачи принятия решений.

*Эксперт* — высококвалифицированный специалист, сотрудник компании (участника) или независимый специалист, который представляет интересы компании (участника) по экспертным вопросам и задачам, касающихся рейтинга, но не несет ответственности за результат.

### 1.9.2 Генерация критериев и сбор данных для ранжировки

- Определяется конкретный период для подготовки и сбора данных. Согласно Перечню окончательных исходных данных, все участники предоставляют необходимые данные Агентству для построения рейтинг-листа.
- Агентство строит рейтинг-лист на основании исходных данных конкретного периода, используя визуальный метод определения весов для критериев и комбинированный метод скаляризации.
- Компания желающая принимать участие в рейтинге, отправляет свои данные с критериями в рейтинговое Агентство.
- Критерии не должны дублироваться или быть взаимно зависимы.
- Критерий должны отражать стороны их научной деятельности:

### Список критериев

<ul style="list-style-type: none"> <li>- разработки в стадии лабораторных исследований.</li> <li>- разработки в экспериментальной стадии.</li> <li>- прототипы.</li> <li>- количество разработанных новых материалов.</li> <li>- неудачные разработки.</li> <li>- внедренные в коммерческие продукты с использованием новых материалов.</li> <li>- ISO, ГОСТ и т. д.</li> <li>- сертификаты, призы.</li> <li>- области специализации.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- соблюдение экологических норм.</li> <li>- устранения проблем (нарушений, дефектов структуры кристаллов и т.д.)</li> <li>- количество научных публикации по материаловедению.</li> <li>- количество других научных публикации.</li> <li>- количество патентов.</li> <li>- понижения стоимости производств.</li> <li>- количество известных ученых в штате.</li> <li>- количество студентов практикантов .</li> <li>- собственные лаборатории.</li> <li>- опыт в сферах специализации.</li> </ul>
--	--

- Рейтинговое агентство получает список от всех компаний участников, анализирует, и при участии Экспертов от каждой компании, корректирует общий и окончательный перечень критериев.
- Важность критериев отдельно оценивается и ранжируется экспертами при помощи визуально интуитивного метода.
- Агентство строит ранжировку компании при помощи комбинированного метода скаляризации на основе экспертных ранжировок критериев.

### 1.9.3 Шкалы критериев и веса

Как уже говорилось ранее, эксперты от каждой компании корректируют общий и окончательный перечень критериев и вводят эти данные в программу. Определяются веса критериев визуально при помощи слайдера (см. 1.9). Сами же критерии, по которым будут оценены объекты, имеют свои шкалы. Шкалы могут быть качественные или количественные, которые сводятся к однородным шкалам при помощи следующей формулы:

$$x' = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)},$$

где  $x$  – вес критерия,  $x'$  – нормализованный вес критерия.

Например, предположим, что у нас есть данные о публикации одной компании и данные о публикациях всех компании [30 и 200]. Чтобы нормализовать эти данные, мы сначала вычитаем 30 из публикации каждой компании и делим результат на 170 (разница между максимальным и минимальным количеством публикации).

### 1.9.4 Формирование рейтинга

Для получения совокупной оценки объекта требуется указать функцию  $f$ , такую что:

$$R = f(x, w) \quad (1.6)$$

В работе в качестве функции  $f$  рассматриваются функции скаляризации,  $F1$  –  $F4$  (см.1.2-1.5), определяющие четыре соответствующие ранжировки, а затем проводится их агрегация методом строчных сумм.

Удобным методом ранжирования в случае, когда число вариантов невелико, является способ присвоения рейтинга на основе парных сравнений вариантов. Пусть  $A_1, \dots, A_j$  – варианты или альтернативы,  $K_1, \dots, K_n$  —

критерии, по которым они оцениваются. Эксперту последовательно предъявляются пары альтернатив  $A_i, A_j$  и предлагается оценить степень  $d_{ij}$  преимущества альтернативы  $A_i$  над альтернативой  $A_j$  относительно некоторого качественного критерия  $K_t$ . При этом, если эксперту была предъявлена пара,  $A_i, A_j$ , и он определил степень превосходства  $d_{ij}$ , то пара  $A_i, A_j$ , уже не предъявляется, а степень превосходства  $d_{ji}$  определяется из соотношения:  $d_{ji} = 1/d_{ij}$ .

Эти числа определяются следующим образом: Число  $d_{ij}$  показывает, во сколько раз альтернатива  $A_i$  превосходит альтернативу  $A_j$  относительно общего свойства или критерия. При этом рекомендуется использовать следующую шкалу приоритетов:

<b>Интенсивность относительной важности</b>	<b>Определение</b>	<b>Объяснение</b>
0	Несравнимы	Эксперт затрудняется в сравнении
1	Равная важность	Равный вклад двух альтернатив в цель
3	Умеренное превосходство одного над другим	Опыт и суждения дают легкое превосходство одной альтернативы над другой
5	Существенное или сильное превосходство	Опыт и суждения дают сильное превосходство одной альтернативы над другой
7	Значительное превосходство	Одной из альтернатив дается настолько сильное превосходство, что оно становится практически значительным
9	Очень сильное превосходство	Очевидность превосходства одной альтернативы над другой подтверждается наиболее сильно

2,4,6,8	Промежуточные решения между двумя соседними суждениями	Применяются в компромиссном случае
Обратные величины приведенных выше чисел	Если при сравнении одной альтернативы с другой получено одно из вышеуказанных чисел, то при сравнении второй альтернативы с первой получим обратную величину	

Следующий этап метода заключается в определении глобальных приоритетов альтернатив с точки зрения достижения цели по всем критериям. Для этого предлагается провести аналогичные процедуры для матриц парных сравнений критериев  $K_1, \dots, K_n$  и матриц парных сравнений альтернатив  $A_1, \dots, A_k$  по отдельным критериям. Получим вектор весов  $v = (v_1, \dots, v_n)$  критериев с точки зрения достижения поставленной цели и набор векторов  $w^{(j)} = (w_1^{(j)}, \dots, w_k^{(j)})$ ,  $j = 1, \dots, n$  весов (приоритетов) альтернатив, рассмотренный по отношению к каждому критерию. Синтез полученных результатов осуществляется путем аддитивной свертки по формуле:

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_i^{(j)} v_j, \quad i = 1, \dots, k \quad (1.8),$$

где  $S_i$  - глобальный приоритет  $i$ -ой альтернативы,  $w_i^{(j)}$  - вес (приоритет) альтернативы  $A_i$ , рассмотренный по отношению критерия  $K_j$ ,  $v_j$  - вес или приоритет критерия  $K_j$  с точки зрения поставленной цели. Использовать аддитивную свертку в силу независимости критериев считается обоснованным, как отмечилось в главе 1.9.2.

### Демонстрация метода:

#### Критерии:

К\_1 — разработки в стадии лабораторных исследований

К\_2 — количество разработанных новых материалов

К\_3 — внедренные, коммерческие продукты с использованием

К\_4 — количество научных публикации по материаловедению

К\_5 — количество патентов (новые материалы, софт для моделирования наноструктур, молекулярной динамики и т.д.).

#### Объекты для оценки: А – Н, это компании участники:

А — AlphaMicron,

В — Arconic,

С – Charter Steel,

D – НикоМаг,

Е – Нейтронные технологии,

F – Vecton,

G – GOJO Industries, Inc.,

Н – Goodyear Tire .

Вектор весов критериев:  $V = (V_1 \dots V_8)$ .

Таблица 1.2. Сравнение критериев

	К_1	К_2	К_3	К_4	К_5	ВЕС
К_1	1	3	3	5	2	0.39
К_2	1/3	1	1/3	5	1/3	0.112
К_3	1/3	3	1	3	1/3	0.158
К_4	1/5	1/5	1/3	1	1/5	0.049
К_5	1/2	3	3	5	1	0.293

Получили вектор весов:  $V = (0.39, 0.112, 0.158, 0.049, 0.293)$

Оценка по первому критерию — К1:

Таблица 1.3. Разработки в стадии лабораторных исследований.

К_1	A	B	C	D	E	F	G	H	
A	1	3	5	3	3	3	3	5	0.296
B	1/3	1	3	3	1/5	1/3	5	1/7	0.078
C	1/3	1/3	1	5	3	3	7	5	0.178
D	1/3	1/3	1/5	1	3	1/5	9	1/7	0.06
E	1/3	5	1/3	1/3	1	5	3	7	0.144
F	1/3	3	1/3	5	1/5	1	3	1/9	0.076
G	1/3	1/5	1/7	1/9	1/3	1/3	1	1/7	0.025
H	1/5	7	1/5	7	1/7	9	7	1	0.143

$$A_{\max} = 8.504$$

$$ИС = 0.072$$

$$ОС = 0.051$$

Оценка по первому критерию — К2:

Таблица 1.4. Количество разработанных новых материалов.

К_2	A	B	C	D	E	F	G	H	
A	1	3	3	2	3	5	4	2	0.278
B	1/3	1	2	2	3	3	1	2	0.158
C	1/3	1/2	1	4	2	3	5	2	0.169
D	1/2	1/2	1/4	1	2	2	2	2	0.106
E	1/3	1/3	1/2	1/2	1	4	3	3	0.106
F	1/5	1/3	1/3	1/2	1/4	1	1/2	1/2	0.043
G	1/4	1	1/5	1/2	1/3	2	1	1/4	0.054
H	1/2	1/2	1/2	1/2	1/3	2	4	1	0.085

$$A_{\max} = 8.975$$

$$ИС = 0.14$$

$$ОС = 0.099$$

Оценка по первому критерию — К3:

Таблица 1.5. Внедренные, коммерческие продукты с использованием.

К_3	A	B	C	D	E	F	G	H	
A	1	3	1/5	4	2	4	3	1/5	0.158
B	1/3	1	2	1/4	3	5	2	1	0.143
C	3	1/2	1	2	5	1/4	4	3	0.2
D	1/4	4	1/2	1	4	3	2	5	0.154
E	1/2	1/3	1/5	1/4	1	3	2	5	0.098
F	1/4	1/5	4	1/3	1/3	1	4	2	0.094
G	1/3	1/2	1/4	2	1/2	1/4	1	1/5	0.054
H	1/3	1	1/3	1/3	1/5	1/2	5	1	0.099

$$A_{\max} = 12.627$$

$$ИС = 0.661$$

$$ОС = 0.469$$

Оценка по первому критерию — К4:

Таблица 1.6. Количество научных публикации по материаловедению.

К_4	A	B	C	D	E	F	G	H	
A	1	2	4	3	1/2	1	5	3	0.227
B	1/2	1	1/4	2	3	2	1/3	4	0.129
C	1/4	4	1	5	1/4	3	2	1/3	0.133
D	1/3	1/2	1/5	1	1	2	4	1/5	0.115
E	2	1/3	4	1	1	2	4	1/5	0.142
F	1	1/2	1/3	1/2	1/2	1	1/2	3	0.084
G	1/5	2	1/2	1/3	1/4	2	1	2	0.089
H	1/3	1/4	3	1/4	5	1/3	1/2	1	0.082

$$A_{\max} = 11.673$$

$$ИС = 0.525$$

$$ОС = 0.372$$

Оценка по первому критерию — К5:

Таблица 1.7. Количество патентов.

К_5	A	B	C	D	E	F	G	H	
A	1	4	3	1/2	3	1/4	1	3	0.163
B	1/4	1	2	4	3	1/2	2	1/4	0.124
C	1/3	1/2	1	5	1	3	2	2	0.157
D	1/2	1/4	1/5	1	4	1/3	4	3	0.125
E	1/3	1/3	1	1/4	1	2	5	4	0.119
F	1/4	2	1/3	3	1/2	1	2	3	0.175
G	1/3	1/2	1/2	1/4	1/5	1/2	1	1/5	0.051
H	1/3	4	1/2	1/3	1/4	1/3	5	1	0.087

$$A_{\max} = 12.627$$

$$ИС = 0.661$$

$$ОС = 0.469$$

Таблица 1.8 . Оценки

0.296	0.278	0.158	0.227	0.163	*		0.23
0.078	0.158	0.143	0.129	0.124			0.113
0.178	0.169	0.2	0.133	0.157		0.39	0.172
0.06	0.106	0.154	0.115	0.125		0.112	0.102
0.144	0.106	0.098	0.142	0.119		0.158	0.125
0.076	0.043	0.094	0.084	0.175		0.049	0.105
0.025	0.054	0.054	0.089	0.051		0.293	0.044
0.143	0.085	0.099	0.082	0.087			0.11

A – AlphaMicron получила наивысшую оценку,

G – Goodyear Tire наименьшую:

$$A = 0.23$$

$$B = 0.113$$

$$C = 0.172$$

$$D = 0.102$$

$$E = 0.125$$

$$F = 0.105$$

$$G = 0.044$$

$$H = 0.11$$

### 1.9.5 Типичные ошибки

Опишем типичные ошибки, которые возникают при формировании рейтинга[1][2][4][5][9].

1. *Неправильный выбор шкал.* Закон Миллера показывает, что эксперт не способен различать более девяти градаций шкалы. Существует возможность использовать шкалы с большим числом градаций, если использовать метод оптимального шкалирования.

2. *Нехватка знаний в тонкостях получения данных от экспертов.*

Часто пытаются получить информацию от экспертов, которую он не может предоставить с достаточной надежностью.

3. *Назначение некорректных численных весов критериям.* Есть гипотеза и много работ, где показано, что человек не в состоянии корректно назначать веса критериям даже если шкалы вербальные.

4. *Агрегирование оценок критериев с использованием взвешенной суммы.* Доказано, что использование взвешенной суммы корректна только в том случае, когда критерии взаимно независимы по предпочтению.

5. *Неправильный способ агрегирования.* Аддитивную функцию можно применять только в том случае, когда выполнено условие взаимной компенсации.

6. *Отсутствие анализа согласованности оценок экспертов.* В зависимости от количества оценок и вида их распределения следует выбирать адекватные способы анализа согласованности, дабы избежать от абсурдных показателей.

7. *Исходные данные.* Для реализации предлагаемых методов нужны правильные исходные данные.

## 2. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

## 2.1 Реализация метода

**Этап 1.** Рейтинговая компания получает данные от участников. Эксперты формируют набор критериев и вводят эти данные в программу.

Определяются веса критериев визуально при помощи слайдера.

**Этап 2.** Создается матрица парных сравнений критериев и применяется метод строчных сумм.

**Этап 3.** Формируются веса критериев путем умножения вектора строчных сумм на вектор весов, предложенный экспертом.

**Этап 4.** Вводятся данные в матрицу компания\*критерий. Шкалы критериев сводятся к однородным шкалам.

**Этап 5.** Применяется комбинированный метод ранжировки. Проводится сравнение с методом турнирного выбора. На экран выводится результат – ранг компаний.

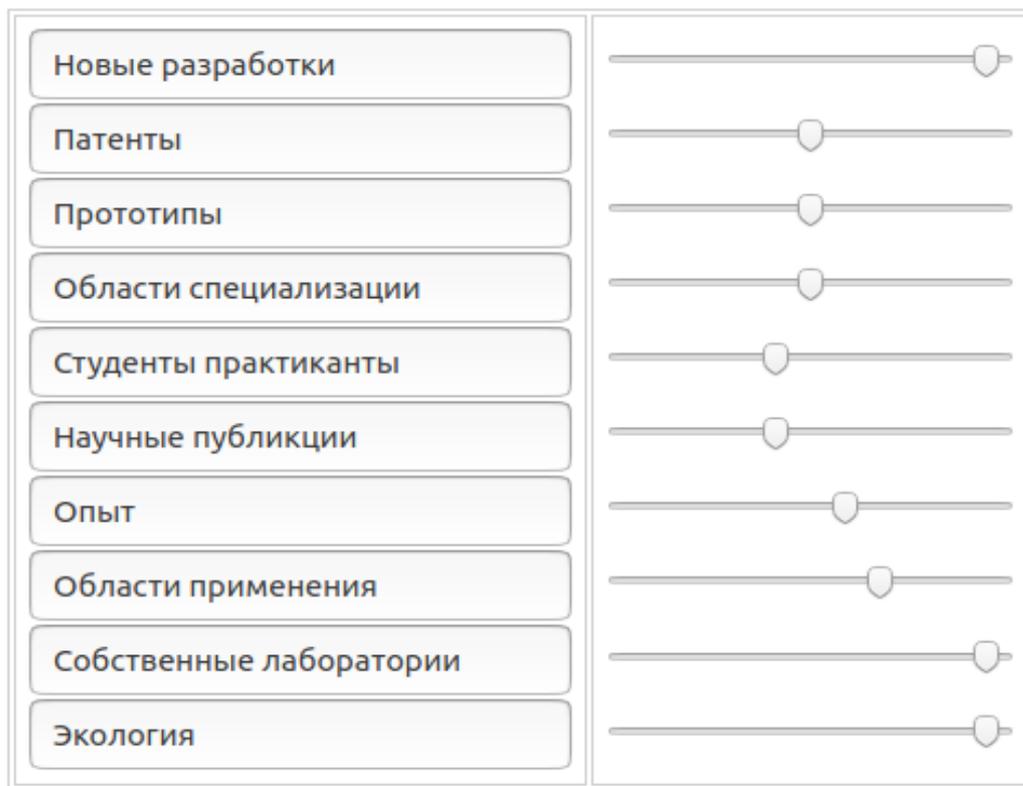


Рис. 2.1.

Создать таблицу для критериев

	Новые разработки	Патенты	Прототипы	Области специализации	Студенты практиканты	Научные публикации	Опыт	Области применения	Собственные лаборатории
Новые разработки	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Патенты	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Прототипы	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Области специализации	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Студенты практиканты	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Научные публикации	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Опыт	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Области применения	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Собственные лаборатории	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Экология	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Рис 2.2. Матрица парных сравнений критериев.

Создать объект

AlphaMicron	Arconico	Charter Steel	ЗАО «НикоМаг»	ООО «Нейтронные технологии»
-------------	----------	---------------	---------------	-----------------------------

Рис. 2.3. Генерации объекта.

Создать таблицу

	Новые разработки	Патенты	Прототипы	Области специализации	Студенты практиканты	Научные публикации	Опыт	Области применения	Собственные лаборатории	Экология
	0.08210432805731400	0.042084168330673354	0.053106212424849704	0.0611224448897797	0.039278557114228460	0.03707535070140281	0.001322645290581105	0.07959591983967936	0.08817635270541083	0.108210432805731
AlphaMicron	4	1	1	6	1	10	30	6	1	1
Arconico	1	1	1	7	1	0	30	1	1	1
Charter Steel	1	1	1	3	1	0	35	1	1	1
ЗАО «НикоМаг»	1	1	1	3	1	0	16	3	1	1
ООО «Нейтронные технологии»	1	1	1	10	1	25	20	1	1	1

Рис.2. 4. Генерации таблицы, компания\* критерий .

Ранжировать

#### Аддитивная функция скаляризации

1. AlphaMicron : 3.9484
2. ООО «Нейтронные технологии» : 3.2725
3. Charter Steel : 2.8226
4. Arconic : 2.7605
5. ЗАО «НикоМаг» : 1.8174

#### Мультипликативная функция скаляризации

1. AlphaMicron : 1.9733
2. ООО «Нейтронные технологии» : 1.5616
3. Arconic : 1.3875
4. ЗАО «НикоМаг» : 1.3840
5. Charter Steel : 1.3299

#### Каноническая аддитивно-мультипликативная функция скаляризации

1. AlphaMicron : 17.2151
2. ООО «Нейтронные технологии» : 14.7623
3. Arconic : 11.5762
4. Charter Steel : 11.1398
5. ЗАО «НикоМаг» : 7.3771

#### Энтропийная функция скаляризации

1. AlphaMicron : 0.7007
2. ООО «Нейтронные технологии» : 0.6795
3. ЗАО «НикоМаг» : 0.6760
4. Arconic : 0.6750
5. Charter Steel : 0.6722

#### Агрегирование результатов скаляризации

1. AlphaMicron : 23.8377
2. ООО «Нейтронные технологии» : 20.2760
3. Charter Steel : 16.4625
4. Arconic : 15.9594
5. ЗАО «НикоМаг» : 11.1968

Рис 2.5. Результаты комбинированного метода ранжировки

	AlphaMicron	Arconic	Charter Steel	ЗАО «НикоМаг»	ООО «Нейтронные технологии»	
AlphaMicron	1	2	2	2	2	9
Arconic	0	1	1	1	1	4
Charter Steel	0	1	1	1	1	4
ЗАО «НикоМаг»	0	1	1	1	1	4
ООО «Нейтронные технологии»	0	1	1	1	1	4
<b>Новые разработки</b>						
AlphaMicron	1	1	1	1	1	5
Arconic	1	1	1	1	1	5
Charter Steel	1	1	1	1	1	5
ЗАО «НикоМаг»	1	1	1	1	1	5
ООО «Нейтронные технологии»	1	1	1	1	1	5
<b>Патенты</b>						
AlphaMicron	1	1	1	1	1	5
Arconic	1	1	1	1	1	5
Charter Steel	1	1	1	1	1	5
ЗАО «НикоМаг»	1	1	1	1	1	5
ООО «Нейтронные технологии»	1	1	1	1	1	5
<b>Прототипы</b>						
AlphaMicron	1	0	2	2	0	5
Arconic	2	1	2	2	0	7
Charter Steel	0	0	1	1	0	2
ЗАО «НикоМаг»	0	0	1	1	0	2
ООО «Нейтронные технологии»	2	2	2	2	1	9
<b>Области специализации</b>						
AlphaMicron	1	1	1	1	1	5
Arconic	1	1	1	1	1	5
Charter Steel	1	1	1	1	1	5
ЗАО «НикоМаг»	1	1	1	1	1	5
ООО «Нейтронные технологии»	1	1	1	1	1	5
<b>Студенты практиканты</b>						

Рис. 2.6.1. Результаты парных сравнений турнирного выбора (начало).

AlphaMicron	1	2	2	2	0	7
Arconic	0	1	1	1	0	3
Charter Steel	0	1	1	1	0	3
ЗАО «НикоМаг»	0	1	1	1	0	3
ООО «Нейтронные технологии»	2	2	2	2	1	9
<b>Научные публикации</b>						
AlphaMicron	1	1	0	2	2	6
Arconic	1	1	0	2	2	6
Charter Steel	2	2	1	2	2	9
ЗАО «НикоМаг»	0	0	0	1	0	1
ООО «Нейтронные технологии»	0	0	0	2	1	3
<b>Опыт</b>						
AlphaMicron	1	2	2	2	2	9
Arconic	0	1	1	0	1	3
Charter Steel	0	1	1	0	1	3
ЗАО «НикоМаг»	0	2	2	1	2	7
ООО «Нейтронные технологии»	0	1	1	0	1	3
<b>Области применения</b>						
AlphaMicron	1	1	1	1	1	5
Arconic	1	1	1	1	1	5
Charter Steel	1	1	1	1	1	5
ЗАО «НикоМаг»	1	1	1	1	1	5
ООО «Нейтронные технологии»	1	1	1	1	1	5
<b>Собственные лаборатории</b>						
AlphaMicron	1	1	1	1	1	5
Arconic	1	1	1	1	1	5
Charter Steel	1	1	1	1	1	5
ЗАО «НикоМаг»	1	1	1	1	1	5
ООО «Нейтронные технологии»	1	1	1	1	1	5
<b>Экология</b>						

Рис. 2.6.2. Результаты парных сравнений турнирного выбора (продолжение).

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### 3.1 Вывод

Получен рейтинг 4-х компаний, специализирующихся на разработках в области структурного материаловедения. Во всех пяти методах комбинированной модели ранжирования лидирует компания AlphaMicron. Полный список результатов рейтинга можно посмотреть на Рис. 2.5 и можно сравнить эти результаты с результатами турнирного выбора на Рис.2.6.1 – 2.6.2 .

- Разработана модель получения корректной оценки компаний, позволяющая сформировать их рейтинг.
- Определены критерии оценки компаний, специализирующихся в области структурного материаловедения.
- Предложена визуализация процесса формирования весов критериев.
- Разработан и программно реализован алгоритм получения скалярной оценки компании.
- Сформирован рейтинг компаний, работающих в данной отрасли.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. В. А. Осипова, Н.С. Алексеев. Математические методы поддержки принятия решений.- М: ИНФРА-М, 2019, 133с.
2. А. Б. Петровский. Теория принятия решений: учебник для студ. высш. Учеб. заведений / А. Б. Петровский. - М. : Издательский центр «Академия», 2009. - 400 с. - (Университетский учебник. Сер. Прикладная математика и информатика).
3. А. Н. Колмогоров. Элементы теории функций и функционального анализа / А. Н. Колмогоров, С. В. Фомин. - М. : Физматлит, 2006.
4. О. И. Ларичев. Теория и методы принятия решений, а также хроника событий в волшебных странах. – М:Логос, 2006
5. Б. Г. Литвак. Экспертные оценки и принятие решений. - М. Патент, 1996.
6. Дж. Нейман. Теория игр и экономическое поведение / Дж. Фон Нейман, О. Моргенштерн. - М. : Наука, 1970.
7. Т. Саати. Принятие решений. Метод анализа иерархий. - М. :Радио и связь, 1993.
8. Т. Р. Брахман. Многокритериальность и выбор альтернативы в технике. — : Радио и связь, 1984. — 287 с.
9. H. Raiffa. Decision Analysis.- Addison-Wesley, Reading, Mass., 1968
10. F. Aleskerov, B. Monjardet – Utility Maximization, Choice and Preference. Berlin: Springer-Verlag, 2002.
11. B. Roy. Multicriteria methodology for decision aiding. — Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996. — 293 p.
12. D. Kahneman, A. Tversky. Choices, values, and frames. — Cambridge University Press, 2000. — 840 p.

13. D. R. Anderson. An introduction to management science: a quantitative approach to decision making / D. R. Anderson, D. J. Sweeney, T. A. Williams. - Minneapolis : West Publishing Company, 2001.
14. K. J. Arrow. Social choice and individual values. - New York: Wiley, 1951.
15. J. C. Harsanyi. Rational behavior and bargaining equilibrium in games and social situations. - Cambridge : Cambridge University Press, 1976.
16. W. Edwards. Utility theories: Measurements and applications. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1992.