

УДК 519.816

## **Модификация метода анализа иерархий для повышения объективности принимаемых решений**

**Соловьева И.А.<sup>1\*</sup>, Соловьев Д.С.<sup>2\*\*</sup>, Литовка Ю.В.<sup>1\*\*\*</sup>, Коробова И.Л.<sup>1\*\*\*\*</sup>**

*<sup>1</sup>Тамбовский государственный технический университет,*

*ул. Советская, 106, Тамбов, 392000, Россия.*

*<sup>2</sup>Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина,*

*ул. Интернациональная, 33, Тамбов, 392000, Россия*

*\*e-mail: good.win32@yandex.ru*

*\*\*e-mail: solovjevdenis@mail.ru*

*\*\*\*e-mail: polychem@list.ru*

*\*\*\*\*e-mail: ira.sapr.tstu@mail.ru*

### **Аннотация**

В изделиях авиационной техники практически на все металлические детали и узлы наносятся те или иные покрытия в целях защиты их от коррозии, действия высоких температур или придания требуемого декоративного вида. В работе рассматриваются основные традиционные и нетрадиционные подходы к решению проблем, возникающих при нанесении гальванических покрытий для ремонта авиационных деталей, пораженных коррозией, и улучшения их качественных характеристик. Авторами предлагается использование методов теории принятия решений для урегулирования ряда таких проблем. Рассматривается модификация традиционного алгоритма метода анализа иерархий на примере выбора металла гальванического покрытия для обрабатываемого изделия. Данная модификация

направлена на снижение доли участия эксперта в процессе принятия решения с целью сделать выбор более объективным.

**Ключевые слова:** принятие решений, модифицированный метод анализа иерархий, многокритериальная задача, объективный выбор, весовые коэффициенты.

### **Введение**

Большинство узлов и деталей в авиационных конструкциях состоит из металлических материалов и сплавов. Развитию коррозии в металлических узлах и агрегатах авиационных конструкций способствует их контактирование между собой, а также с газообразной и жидкой средами [1]. Сложные температурные условия и атмосферные явления, в которых эксплуатируется авиационная техника, такие как, например, конденсация влаги при возвращении из высотного полета самолета на землю, также интенсифицируют разрушение металлических конструктивных элементов [2, 3]. Немаловажную роль оказывают и продукты жизнедеятельности микроорганизмов, вызывающие биокоррозию (характерно для эксплуатации в условиях тропического климата) [4]. Таким образом, развития коррозионных процессов невозможно избежать при эксплуатации авиационной техники. Традиционно для ремонта деталей, пораженных коррозией, и улучшения их характеристик (защитных и декоративных) используются гальванические покрытия. В свою очередь получение покрытий с требуемыми характеристиками является одной из главных проблем, возникающих в гальваническом производстве, которая сопряжена с обработкой и анализом больших объемов экспериментально-

статистической информации. Необходимо выбрать и управлять режимами электролиза [5] и составом электролита [6]. Технолог должен оптимизировать конфигурацию ванн [7], анодов [8] и защитных экранов [9] с целью реализации оптимальных условий нанесения покрытий на изделие. Тем не менее, поиск оптимальных условий нанесения гальванических покрытий на изделие относится к классу слабоструктурированных и многокритериальных задач, в ряде случаев вообще не поддающихся формализации. Поэтому оптимальные условия в задачах данного класса могут быть найдены только при сочетании опыта, знаний и интуиции лица, принимающего решение. Для их поиска могут использоваться методы интеллектуального анализа данных, нейронных сетей, рассуждений на основе продукционных моделей знаний, генетических алгоритмов и имитационного моделирования. Так, в работе [10] описывается использование искусственной нейронной сети для прогнозирования скорости роста толщины покрытия. Работа [11] посвящена разработке продукционной модели, основанной на нечеткой логике, для управления кислотностью электролитов. Работа [12] сравнивает эффективность генетических алгоритмов со статистической регрессией в задаче определения факторов, которые оказывают наибольшее влияние на характеристики гальванических покрытий. В свою очередь отсутствуют работы, направленные на поиск решения многокритериальных задач гальванических производств с использованием методов теории принятия решений.

Целью работы является повышение объективности процесса принятия решения в многокритериальных задачах гальванического производства.

## Материалы и методы

Не существует идеального метода решения многокритериальных задач. Так, Парето-оптимальных решений всегда больше одного [13], использование обобщенного критерия взаимно компенсирует уменьшение одного из частных критериев увеличением другого [14], а выделение ярко выраженного главного критерия не всегда возможно [15]. Одним из выходов из сложившейся ситуации является использование экспертных оценок. Детальная проработка данного подхода рассматривается в методе анализа иерархий (далее – МАИ), предложенного Т. Саати в работе [16]. В связи с тем, что схема применения МАИ не привязана к конкретной предметной области, а метод является универсальным, ему отдается предпочтение для достижения поставленной цели. Традиционный алгоритм МАИ имеет множество модификаций. Так работа [17] посвящена разработке методики агрегирования многокритериальных предпочтений для случая, когда важность критериев не является постоянной, а зависит от оценок альтернатив. В работе [18] рассматривается проблема некорректного оценивания значимости динамических наборов альтернатив. Особенности использования нечеткой логики для анализа иерархий исследуются в работе [19]. Несмотря на значительный объем работ в данном направлении присущим недостатком алгоритма МАИ все еще остается рост трудоемкости процедуры составления непротиворечивых матриц парных сравнений, индекс согласованности для которых должен быть меньше 10% при увеличении числа критериев или альтернатив (уже при 12-15 альтернативах или критериях процедура становится трудоемкой). В свою очередь, при проведении экспертиз с использованием методов группового выбора возникает необходимость

комплексирования мнений экспертов и получения достоверного обобщенного мнения. При участии в принятии решения группы экспертов, расхождения в их суждениях неизбежны, в силу этого только при условии высокой согласованности их ответов можно считать групповую оценку достаточно надежной. В связи с этим рассмотрим авторскую модификацию алгоритма МАИ, направленную на снижение доли участия экспертов в процессе принятия решения:

1. Ввод  $M$  альтернатив и  $N$  критериев.

2. Построение иерархической структуры, содержащей уровни «Цель» - «Критерии» - «Альтернативы».

3. Привлечение экспертов для построения обратно симметричной матрицы  $W$ , составляемой путем попарного сравнения критериев с применением шкалы, в которой: 1 – равная важность; 3 – умеренное превосходство; 5 – значительное превосходство; 7 – сильное превосходство; 9 – очень сильное превосходство; 2, 4, 6, 8 – промежуточные случаи; их обратные значения.

4. Рассчитывается собственный вектор  $S$  полученной матрицы  $W$ , элементы которого определяются как корень  $N$ -й степени из произведения элементов в  $k$ -й строке матрицы  $W$ . Весомость  $X_W$  для  $h$ -го критерия определяется отношением  $k$ -го элемента собственного вектора  $S$  на сумму всех  $N$  значений его элементов. Значение индекса согласованности (далее – ИС) определяется как:

$$\text{ИС} = \frac{\lambda_{\max} - N}{N - 1}, \quad (1)$$

где  $\lambda_{\max}$  – максимальное собственное значение матрицы  $W$ .

5. Если отношение согласованности (далее – ОС), рассчитываемое как частное от деления ИС на случайный индекс (далее – СИ), меньше 10%, то переход к п. 7, иначе переход к п. 6.

6. Осуществляется пересогласование матрицы с привлечением экспертов, проводящих суждения, для перепроверки и корректировки ее элементов путем проведения дополнительного анкетирования и обобщения полученных результатов с использованием, например, среднего арифметического и т.д. Переход к п. 4.

7. Составление  $h$  ( $h=1, 2, \dots, N$ ) матриц попарных сравнений  $V^h$  для  $M$  альтернатив.

7.1. Если  $h$ -й критерий оценки  $i$ -й альтернативы задан количественно, то переход к п. 7.2.1, иначе переход к п. 7.3.1.

7.2.1. Элемент  $v_{i,j}$  и симметричный ему  $v_{j,i}$  в матрице  $V^h$  оценки альтернатив по критерию  $Z^h$  получаем отношением значений критериев, соответствующих  $A_i$  и  $A_j$  альтернативам:

$$v_{i,j}^h = \frac{Z^h(A_i)}{Z^h(A_j)}, \quad (2)$$

$$v_{j,i}^h = \frac{1}{v_{i,j}^h}, \quad (3)$$

7.2.2. Весомость по  $h$ -му критерию  $i$ -й альтернативы определяется как:

$$X_i^h = \frac{S_i^h}{\sum_{i=1}^M S_i^h} g(Z^h), \quad (4)$$

где  $g(Z^h)$  – функция, дающая отрицательное значение в случае максимизации  $h$ -го критерия и положительное – в случае его минимизации:

$$g(Z^h) = \begin{cases} 1, & \text{если } Z^h \rightarrow \min, \\ -1, & \text{если } Z^h \rightarrow \max. \end{cases} \quad (5)$$

Переход к п. 7.1.

7.3.1. Привлечение экспертов для построения обратно симметричной матрицы попарного сравнения альтернатив по критерию с использованием подхода, аналогичного п. 3.

7.3.2. Рассчитывается весомость каждой альтернативы по критерию и ИС с использованием подхода, аналогичного п. 4.

7.3.3. Если ОС для h-й матрицы меньше 10%, то переход к п. 7.1, иначе к п. 7.3.4.

7.3.4. Пересогласование h-й матрицы сравнения альтернатив с использованием подхода, аналогичного п. 6, переход к п. 7.3.1.

8. Расчет вектора глобальных приоритетов  $Q$ , элементы которого определяются как сумма произведений весомости критериев  $X_w$  на вектор приоритета критерия по каждой i-й альтернативе  $X_i^h$ .

9. Вывод наиболее подходящей альтернативы, индекс которой соответствует индексу максимального значения элемента вектора  $Q$ .

Схема работы алгоритма МАИ с внесенными авторами модификациями, описанными в п. 7.2.1 и п. 7.2.2, представлена на рис. 1.

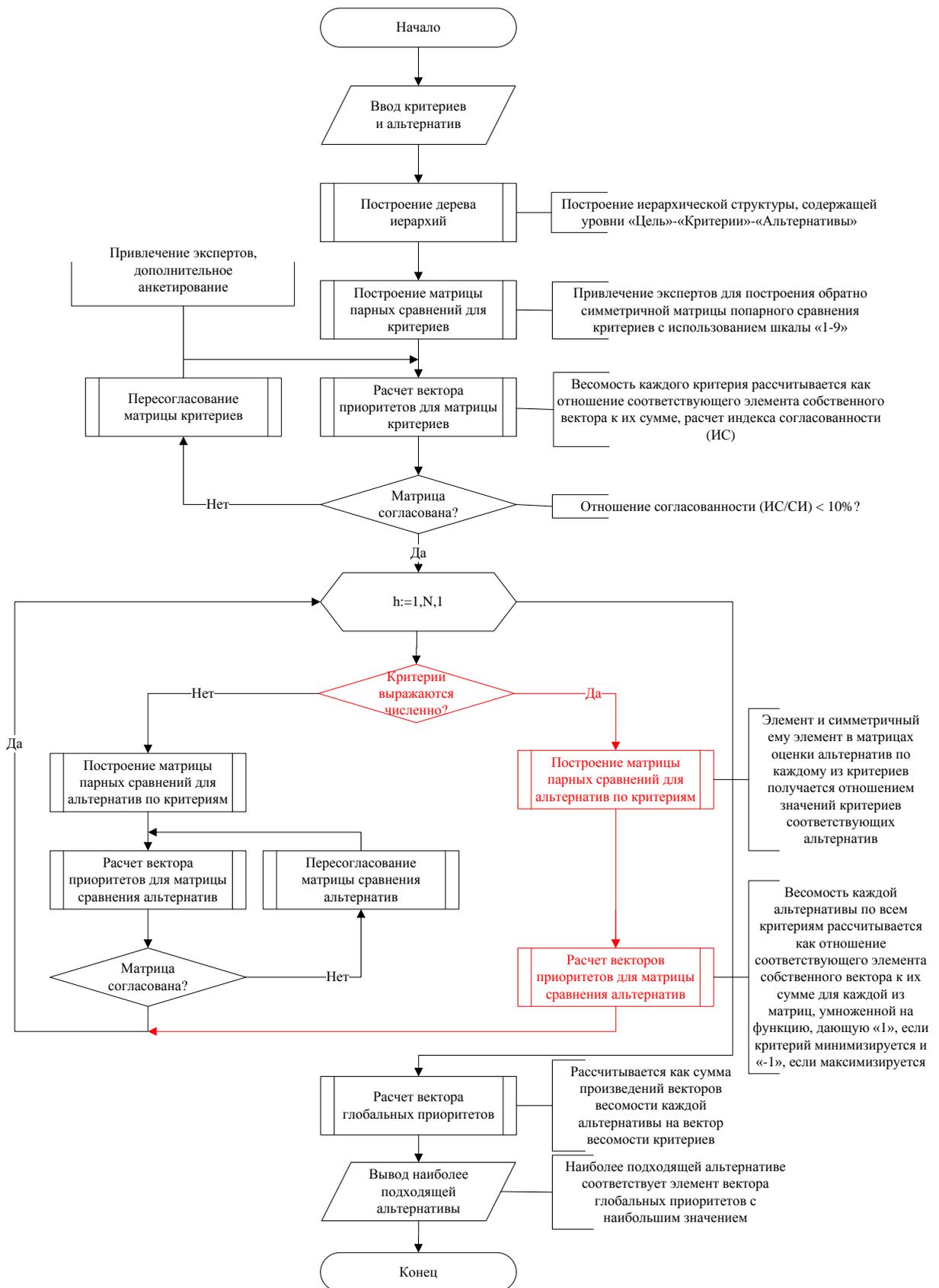


Рис. 1. Модификация традиционного алгоритма МАИ

Следует отметить, что в предлагаемой модификации сохраняется единичное значение элементов главной диагонали составленной матрицы

$$v_{i,j=i}^h = Z_h(A_i) \cdot (Z_h(A_{j=i}))^{-1} = 1 \quad (\text{принцип равноценности альтернативы}).$$

### Вычислительный эксперимент

Рассмотрим работу модификации традиционного алгоритма МАИ на примере многокритериальной задачи выбора варианта гальванического покрытия. Пусть имеются следующие альтернативы вариантов металлов покрытия: палладий – Пд; платина – Пл; родий – Рд; золото – Зл; серебро – Ср; медь – М; хром – Х; никель – Н; цинк – Ц. Каждая из альтернатив оценивается с точки зрения экономических (стоимость – далее С), физико-механических (микротвердость и коэффициент отражения – далее HV и  $K_{отр}$  соответственно), технологических (длительность процесса – далее  $\tau$ ) и экологических критериев (далее – ЭК). Требуется определить наилучший вариант покрытия для конкретного изделия (например, лопаток компрессора авиационного двигателя). В табл. 1 представлены вычисленные значения рассматриваемых критериев для выбранных альтернатив металлов покрытия.

Построим иерархическую структуру (рис. 2), включающую в себя цель (выбор наилучшего металла покрытия), критерии, по которым желательно получить наилучшие результаты ( $C \rightarrow \min$ ,  $HV \rightarrow \max$ ,  $\tau \rightarrow \min$ ,  $K_{отр} \rightarrow \max$ ,  $ЭК \rightarrow \min$ ), и альтернативы возможных металлов покрытия. В табл. 2 приводятся результаты попарного сравнения критериев по важности с рассчитанным вектором приоритетов  $X_w$ .

Табл. 1. Исходные значения критериев для различных альтернатив

	С, руб	Н, МПа	$\tau$ , ч	$K_{отр}$ , %	$\text{ЭК} \cdot 10^6$
Зл	330	500	1,048	85	0,6
Ср	250	600	0,395	95	4,3
Ц	50	550	0,516	55	0,4
Пд	420	3000	1,43	68	1,2
Рд	530	8000	0,269	75	0,9
Пл	720	4000	0,312	70	2
М	65	700	0,265	73	20
Н	60	3500	0,214	66	5,2
Х	150	9000	1,662	62	10,2

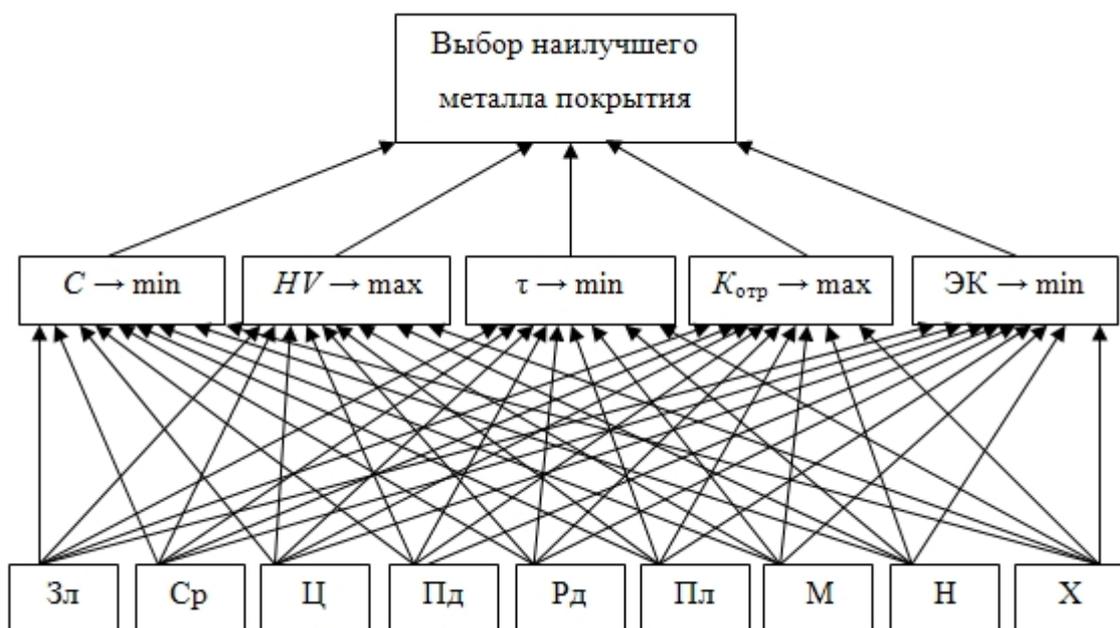


Рис. 2. Иерархическая структура задачи по выбору металла покрытия

Решим поставленную задачу с использованием традиционного алгоритма МАИ (шаги 7.3.1. – 7.3.4.) и предлагаемой авторами модификации (шаги 7.2.1. – 7.2.2), изображенными на рис. 1. При использовании традиционного алгоритма МАИ были привлечены эксперты, для которых контролировались значения ОС в

допустимом пределе (<10%) для попарных сравнений альтернатив по критериям. Полученные значения представлены в табл. 3. Для сравнения 9 альтернатив значение СИ составляет 1,45.

Табл. 2. Попарное сравнение критериев по важности

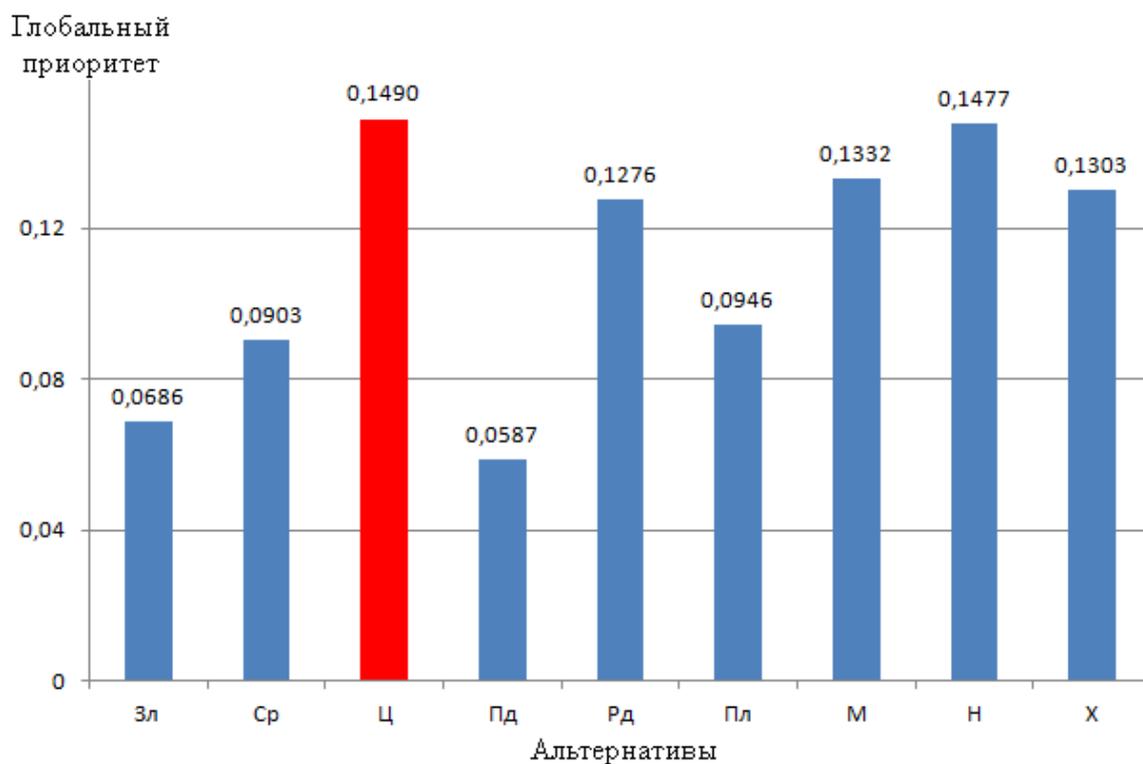
	С	Н	$\tau$	$K_{отр}$	ЭК	$X_w$
С	1	1	2	4	6	0,3527
Н	1	1	1	3	5	0,2795
$\tau$	1/2	1	1	2	4	0,2146
$K_{отр}$	1/4	1/3	1/2	1	2	0,0989
ЭК	1/6	1/5	1/4	1/2	1	0,0543

Табл. 3. Значения ИС и ОС для оценки альтернатив по критериям

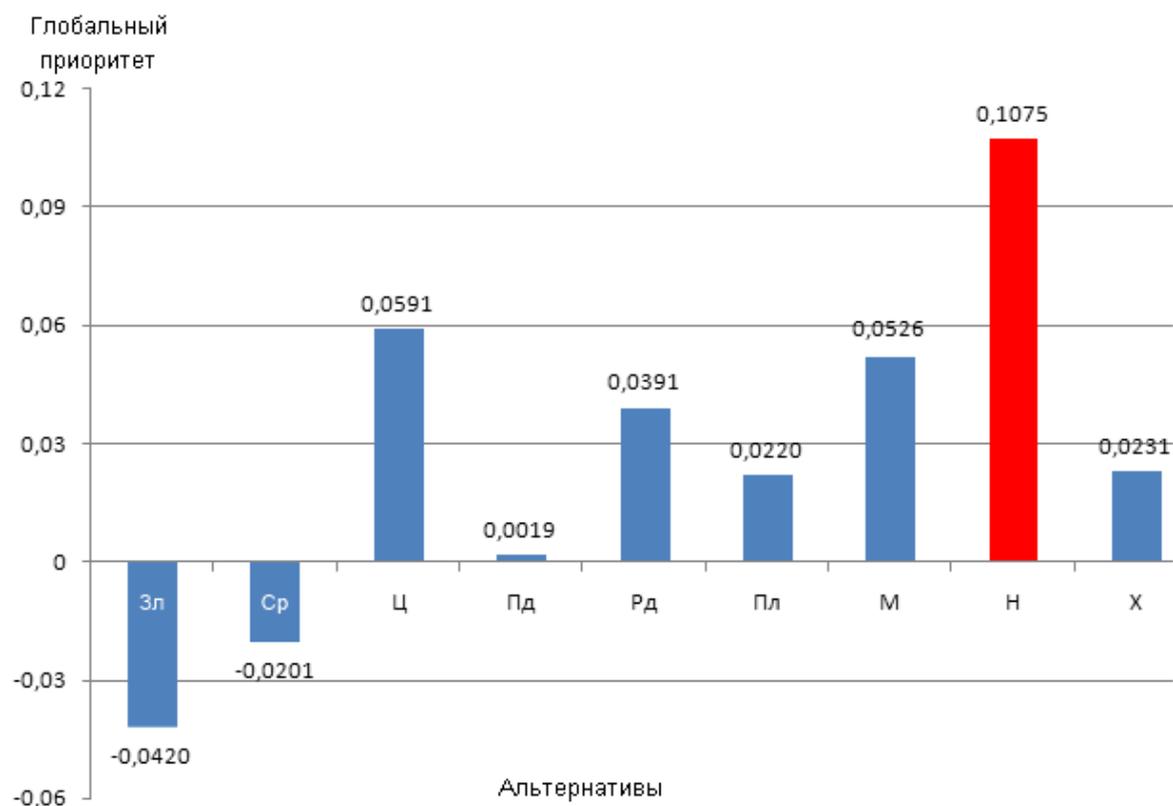
Значение	Критерии				
	С	Н	$\tau$	$K_{отр}$	ЭК
ИС	0,0499	0,0292	0,0621	0,0262	0,0342
ОС, %	3,44	2,01	4,28	1,81	2,36

При расчете вектора глобального приоритета ввиду отсутствия критериев, не выражаемых количественно, не требуется привлечение экспертов для составления матриц парных сравнений альтернатив, расчетов ИС и ОС, а также учета требований к предельным значениям ОС.

На рис. 3 демонстрируются глобальные приоритеты альтернатив металлов гальванического покрытия при использовании традиционного (а) и модифицированного (б) алгоритмов МАИ. Расчет производился в разработанном авторами специализированном программном обеспечении [20].



а)



б)

Рис. 3. Глобальные приоритеты альтернатив металлов гальванического покрытия при использовании традиционного (а) и модифицированного (б) алгоритмов МАИ

Максимальное значение вектора глобального приоритета соответствует альтернативе «Н» при использовании модифицированного алгоритма МАИ (следовательно, рассматриваемое изделие подлежит процессу гальванического никелирования). Однако в случае использования традиционного алгоритма МАИ, наилучшим вариантом являлся «Ц» (цинк).

### **Результаты и их обсуждение**

Полученные различия объясняются расхождением в значениях сформированных весовых коэффициентов для оценки альтернатив по критериям для традиционного и модифицированного алгоритмов МАИ. Различия возникают ввиду субъективности оценки альтернатив с использованием шкалы «1-9», чего удалось избежать в предложенной модификации алгоритма. Следует отметить, что при размерности задачи в  $N$  критериев,  $N'$  ( $N' \leq N$ ) из которых заданы количественно, и  $M$  альтернатив, модификация традиционного алгоритма позволяет устранить эксперта от  $N' \cdot M \cdot (M-1)/2$  парных сравнений без учета необходимости в пересогласовании матриц при величине ОС больше 10%. Для рассматриваемого примера число таких парных сравнений, требуемых от эксперта, составляет 180.

### **Заключение**

Нанесение гальванических покрытий на поверхности металлических узлов и деталей авиационных конструкций остается приоритетным способом достижения ими требуемых свойств. Авторами работы было предложено использование подходов, применяемых в теории принятия решений, для решения проблемы выбора металла покрытия деталей на основе модификации традиционного алгоритма метода анализа иерархий в части формирования матриц парных сравнений для

оценок альтернатив по критериям для повышения его (алгоритма) эффективности за счет сокращения времени на повторные или очередные анкетирования с их последующей обработкой в случае выявления несогласованных ответов экспертов.

### **Библиографический список**

1. Schwinn D.B. Coupling of static and dynamic fuselage design // Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal, 2016, vol. 88, no. 1, pp.1 - 15.
2. Miguel M., Silva C.E.A., Peres M.P., Voorwald H.J.C. Study of influence of zinc-nickel and cadmium electroplated coatings on fatigue strength of aeronautical steels, Fatigue, 2002, pp. 15-23.
3. Davarpanah A., Hemat Ah., Larki M. Coating Removal Techniques in Aerospace Industries: Study Case // Journal Powder Metall. 2017. Min 6: 155 DOI: 10.4172/2168-9806.1000155. URL: <https://www.omicsonline.org/open-access/coating-removal-techniques-in-aerospace-industries-study-case-2168-9806-1000155.pdf>
4. Денкер И.И., Владимирский В.Н. Технология окраски самолетов и вертолетов гражданской авиации. – М.: Машиностроение. 1988. - 128 с.
5. Попович В.А., Гамбург Ю.Д., Сердюченко Н.А., Белименко Г.С, Ямнова Т.П. Электроосаждение цинка реверсируемым током: распределение металла, структура и свойства покрытий // Электрохимия. 1992. Т. 28. № 3. С. 333 – 342.
6. Соловьева Н.Д. Фролова И.И., Легкая Д.А. Физико-химические свойства малокомпонентного электролита никелирования // Конденсированные среды и межфазные границы. 2014. Т. 16. № 2. С. 201 – 205.

7. Garich H., Gebhart L., Taylor E.J., Inman M., McCrabb H. Development and Characterization of Plating Cell Geometry for Printed Circuit Board and Packaging Applications // ECS Transactions, 2017, vol. 3 (16), pp. 1 – 10.
8. Ишкулова А.Р. Анализ конструктивных особенностей анодов для нанесения гальванических покрытий // Theoretical & Applied Science, 2013, vol. 10(6), pp. 45 – 48.
9. Проталинский О.М., Литовка Ю.В., Пашкевич А.А. Система оптимального управления гальванической ванной с токонепроводящим экраном // Датчики и системы. 2009. № 5. С. 35 – 36.
10. Sánchez Lasherasa F., Vilán Vilánb J.A., García Nietoc P.J., del Coz Díazd J.J. The use of design of experiments to improve a neural network model in order to predict the thickness of the chromium layer in a hard chromium plating process // Mathematical and computer modeling, 2010, vol. 52, no. 7 – 8, pp. 1169 – 1176.
11. Zhang J., Zheng Z., Qu Y., You L., Wang S., Li L. pH Fuzzy control of automated industrial electroplating of gold // Chemical & Engineering Technology, 1997, vol. 20, no. 8. pp. 576 – 580.
12. Mon E. Ossman, Walaa Sheta, Eltaweel Y. Linear Genetic Programming for Prediction of Nickel Recovery from Spent Nickel Catalyst // American J. of Engineering and Applied Sciences, 2010, 3 (2), pp. 482 – 488.
13. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. - М.: Физматлит, 2007. – 256 с.
14. Miettinen K. Nonlinear Multiobjective Optimization, Boston, Kluwer Academic Publisher, 1999, 293 p.

15. Кини Р.Л., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. - М.: Радио и связь, 1981. – 560 с.
16. Саати Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. - М.: Радио и связь, 1993. – 316 с.
17. Редько А.О., Смерчинская С.О., Яшина Н.П. Агрегирование предпочтений при переменной важности критериев // Труды МАИ. 2016. № 85. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=67527>
18. Колесникова С.И. Модификация метода анализа иерархий для динамических наборов альтернатив // Прикладная дискретная математика. 2009. №4 (6). С. 102 – 109.
19. Дубровин В.И., Миронова Н.А. Метод получения вектора приоритетов из нечетких матриц парных сравнений // Искусственный интеллект. 2009. № 3. С. 464 – 470.
20. Соловьев Д.С., Мукина И.А., Литовка Ю.В. Решение слабоструктурированных задач принятия решений в гальванотехнике. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ в ФИПС № 2017618189. Дата регистрации: 25.07.2017г.