

Ю. Д. Гвоздкова¹, аспирант, e-mail: gina94@yandex.ru,

И. А. Гвоздкова², канд. физ.-мат. наук, доц., зав. каф., проф., e-mail: gvozdkova@yandex.ru,

А. В. Курочкин², канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., доц., e-mail: avkur2@yandex.ru,

А. В. Черняев¹, д-р техн. наук, проф., e-mail: alex_v_ch@bk.ru,

¹ФГБОУ ВО "Московский авиационный институт

(национальный исследовательский университет)", г. Москва

²ОУП ВО "Академия труда и социальных отношений", г. Москва

Информационная система оценки экологической безопасности авиационных материалов и технологий методом анализа иерархий

Рассматриваются принципы разработки, результаты апробации и рекомендации по развитию автоматизированной информационной системы (АИС) многокритериального анализа экологических преимуществ авиационных технологий и материалов на основе метода анализа иерархий (МАИ). Обосновываются использование наиболее простого алгоритма МАИ для решения поставленной оптимизационной задачи и выбор соответствующего программного обеспечения для его реализации. Излагаются результаты вычислительного эксперимента, выполненного с помощью разработанной АИС в целях изучения возможностей замещения традиционного авиационного топлива альтернативными источниками энергии.

Ключевые слова: информационная система, экологическая и техносферная безопасность, авиационные технологии и материалы, метод анализа иерархий, программное обеспечение, многокритериальная задача, источники энергии

Введение

Одной из актуальных проблем в сфере развития современных авиационных технологий и материалов является обеспечение их экологической безопасности. Для оценки уровня обеспечения социо-эколого-экономической и техносферной безопасности необходима высокоэффективная система показателей устойчивого эколого-технологического, эколого-экономического и социально-экологического развития, позволяющая осуществлять комплексное сравнение изучаемых объектов и процессов [1, 2]. Реализация подобной системы требует развития соответствующих алгоритмов и информационных технологий. В работах [3–5] была предложена методика многокритериального сравнительного анализа эколого-экономических и эколого-технических преимуществ источников энергии для авиатранспорта и материалов для авиационных энергоустановок на основе одного из основных методов математической оптимизации — метода анализа иерархий (МАИ).

При использовании МАИ в задачах принятия решений с большим числом критериев оценки нахождение оптимального варианта становится трудоемким, поскольку требует громоздких вычислений [6–8]. Поэтому в указанных случаях следует применять компьютерное моделирование поиска наилучшего решения [9–11]. В данной статье излагаются основные принципы разработки, результаты апробации и рекомендации по развитию автоматизированной информационной системы многокритериального сравнительного анализа экологических преимуществ авиационных технологий и материалов на основе метода анализа иерархий.

1. Постановка многокритериальной задачи о безопасности авиационных технологий и материалов

Для поиска оптимальных решений разрабатываются и используются многофункциональные автоматизированные информационные

системы (АИС) сбора, передачи и переработки информации об изучаемых процессах и объектах на основе математических методов [11, 12]. Изучение традиционных и перспективных материалов и технологий для летательных аппаратов (ЛА) показало, что выбор наиболее безопасных из них может быть осуществлен с помощью специальной АИС, включающей блок данных, фор-

мируемый путем сбора сведений об исследуемых объектах; алгоритм их сравнительного анализа на основе выбранных критериев оценки; математическую модель нахождения оптимального решения соответствующей многокритериальной задачи; программное обеспечение (ПО) реализации указанной модели; блок рекомендаций, формулируемых на основе анализа результатов,

Таблица 1

Критерии оценки эколого-технических и эколого-экономических характеристик авиационных материалов и технологий *

Категория	Наименование критериев
Экологические критерии	<p><i>Технологии:</i> возобновляемость ресурсов для технологического процесса (ТП); безопасность разработки и использования технологии (Т); возможность утилизации и обезвреживания отходов в ТП; возможность замещения традиционных ископаемых энергоносителей при использовании Т; объемы выбросов загрязняющих веществ при использовании Т; сокращение выбросов парниковых газов и других загрязнителей окружающей среды (ОС) при использовании Т; уровень шума двигателя ЛА; расход пресной воды в ТП; ресурсосбережение и возможность осуществлять рациональное природопользование; удовлетворение Т требованиям экологических стандартов; снижение ущерба, наносимого ОС, при эксплуатации Т; улучшение здоровья людей и климата при использовании Т и т. д.</p> <p><i>Материалы:</i> возобновляемость ресурсов для ТП получения материала (М); безопасность получения и использования М; возможность утилизации и обезвреживания отходов в ТП получения М; объемы выбросов загрязняющих веществ при получении М; сокращение выбросов парниковых газов и других загрязнителей ОС при использовании М; расход пресной воды в ТП получения и использования М; ресурсосбережение; удовлетворение М требованиям экологических стандартов; снижение ущерба, наносимого ОС, при использовании М; улучшение здоровья людей и климата при использовании М и т. д.</p>
Технические критерии	<p><i>Технологии:</i> обеспеченность ТП сырьем; разнообразие сырьевой базы для ТП; качество сырья для ТП; возможность бесперебойного снабжения ТП сырьем; удобство транспортировки сырья для ТП; степень освоенности Т и ее доступность; наличие серийного производства оборудования для ТП; возможность полной комплектации оборудования для ТП на территории страны или региона; КПД ТП; КПД двигателя ЛА, использующего ТП; возможность использования ТП в авиационной технике большой мощности; возможность использования ТП для энергоснабжения двигателя ЛА и систем бортового питания; возможность использования ТП на различных стадиях полета; разнообразие ЛА, в которых можно использовать ТП; масса и габаритные размеры двигателя, использующего ТП; необходимость использования больших площадей и объемов для реализации ТП; необходимость использования большого количества вспомогательной техники; расход энергии в ТП; срок службы двигателя ЛА, использующего ТП; зависимость эффективности работы двигателя ЛА от погодных условий и климата; возможность обеспечения высокой надежности работы двигателя и систем бортового питания; способность обеспечивать непрерывное энергоснабжение двигателя и систем бортового питания; возможность прогнозировать и планировать переработку энергии в ТП; воспламеняемость ТП; наличие научно-технических разработок для развития Т; наличие научно-технологического сотрудничества с зарубежными партнерами; удовлетворение Т требованиям технологических стандартов и т. д.</p> <p><i>Материалы:</i> обеспеченность ТП получения М сырьем; затраты энергии и степень освоенности и доступности Т получения М; долговечность М; возможность использования М в различных авиационных энергоустановках; масса и габаритные размеры энергоустановок, изготовленных из М; возможность обеспечения высокой надежности работы энергоустановки, использующей М; воспламеняемость М; наличие научно-технических разработок для развития Т получения М; удовлетворение М требованиям технологических стандартов и т. д.</p>
Экономические критерии	<p><i>Технологии:</i> стоимость сырья и оборудования для ТП; стоимость двигателя, использующего ТП; себестоимость ТП; экономичность ТП; наличие инфраструктуры для использования ТП в ЛА; наличие спроса на технологических рынках топлива и энергии; отсутствие зависимости ТП от импорта сырья и/или оборудования; увеличение экспорта традиционных энергоносителей при использовании ТП; снижение зависимости от импорта традиционных энергоресурсов при использовании Т; независимость ТП от цен на топливо и его поставок; укрепление позиций на мировых энергетических и технологических рынках и выход на новые рынки при использовании ТП; наличие законодательных и финансовых механизмов поддержки использования Т; увеличение ВВП и налоговых поступлений в бюджеты различных уровней при использовании Т и т. д.</p> <p><i>Материалы:</i> стоимость М и установок на его основе; наличие инфраструктуры для производства и эксплуатации установок на основе М; наличие спроса на рынках материалов, оборудования и технологий; укрепление позиций на мировых энергетических и технологических рынках при реализации ТП получения М и производства установок на его основе; наличие законодательных и финансовых механизмов поддержки ТП получения и использования М и установок на его основе; увеличение ВВП и налоговых поступлений в бюджеты различных уровней при реализации ТП получения и использования М и т. д.</p>
* Источники: [3, 5], разработка авторов.	

полученных в ходе компьютерного моделирования процесса принятия наилучшего решения.

Методика комплексного многофакторного анализа экологических преимуществ и недостатков рассматриваемых технологий и материалов может быть разработана на основе различных математических подходов к принятию оптимальных решений, в том числе — и на основе их синтеза. Одним из ключевых элементов такой методики должна быть совокупность используемых критериев оценки. Поскольку помимо экологических характеристик производителей и потребителей интересуют и другие особенности сравниваемых объектов, указанную совокупность целесообразно разделить на три категории — экологические, технические и экономические критерии [3–5]. В табл. 1 перечислены критерии, которые предлагается использовать в задаче об эколого-технической и эколого-экономической безопасности технологий и материалов для ЛА.

Рейтинг значимости предлагаемых критериев определяется различными аспектами: технологическими, региональными, особенностями предпочтений лиц, принимающих решения (ЛПР) и т. д.

Процесс сравнительного анализа эколого-технических и эколого-экономических характеристик материалов и технологий, используемых в авиации, рекомендуется осуществлять в следующей последовательности: 1) присвоить критериям оценки рейтинг значимости и отобрать для дальнейшего анализа критерии с наиболее высоким рейтингом; 2) провести оценку изучаемых процессов и/или объектов с помощью выбранных критериев; 3) сравнить их с учетом приоритетности критериев на основе одного или нескольких оптимизационных математических методов.

2. Методы решения многокритериальной задачи о безопасности авиационных технологий и материалов

Для решения сформулированной задачи могут быть применены методы функционально-стоимостного анализа (ФСА, Activity Based Costing, ABC-анализ) [13–15], балльной оценки [16], анализ Парето [2, 17] и МАИ [2, 6, 7, 18]. Указанные оптимизационные подходы рекомендуется реализовывать в виде специальных компьютерных программ в целях повышения эффективности вычислительных процедур в разработанной ИС.

МАИ основан на структуризации проблемы выбора в виде совокупности иерархических

уровней (например, уровня цели (верхний уровень), уровня экспертов, уровня критериев оценки, уровня альтернативных решений (нижний уровень)).

Для выбора наиболее оптимальных авиационных технологий и материалов может быть использован вариант МАИ, включающий наряду с уровнем цели два других иерархических уровня — уровень альтернативных решений и уровень критериев их оценки [2, 4, 5]. Тогда решение задачи об определении степени их экологической безопасности с учетом требований к экономической и технологической эффективности рассматриваемых объектов исследования будет включать следующие этапы [2, 4]: 1) присвоение критериям оценки рейтинга значимости и отбор критериев с наиболее высоким приоритетом с учетом региональных, национальных и/или технологических предпочтений и ограничений; 2) сравнение технологий и материалов на основе выбранных экологических, технических и экономических критериев путем вычисления их безразмерных нормированных показателей оценки по каждому критерию; 3) вычисление итоговых (глобальных) весовых коэффициентов изучаемых альтернатив путем свертки их нормированных показателей оценки по критериям и индексов значимости критериев, измеряемых по шкале от 0 до 1; 4) выбор наиболее оптимального из альтернативных решений (с самым высоким итоговым весовым коэффициентом).

В соответствии с типовым алгоритмом МАИ для выбора решения из P альтернативных вариантов на основе N критериев вначале определяют абсолютные значения показателей оценки решений по всем критериям $Q(i, k)$ ($i = 1, 2, \dots, N$, $k = 1, 2, \dots, P$). Затем ЛПР с учетом своих предпочтений вводит абсолютный (ненормированный) рейтинг значимости каждого критерия оценки $R(i)$. Далее вычисляют нормированные значения $R(i)$ и $Q(i, k)$, измеряемые по шкале от 0 до 1 и обозначаемые соответственно $r(i)$ и $q(i, k)$:

$$r(i) = \frac{R(i)}{\sum_{i=1}^N R(i)}; \quad (1)$$

$$q(i, k) = \frac{Q^m(i, k)}{\sum_{k=1}^P Q^m(i, k)}, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad k = 1, 2, \dots, P, \quad (2)$$

где m — параметр, равный 1 или -1 и определяющий, какое значение показателя оценки решения по критерию является наиболее ценным: минимальное или максимальное (например, для выбросов в ОС $m = -1$, а для КПД $m = 1$).

Глобальные (суммарные, или комбинированные) весовые коэффициенты решений $V(k)$ находят по формуле

$$V(k) = \sum_{i=1}^N r(i)q(i, k), k = 1, 2, \dots, P. \quad (3)$$

Значения суммарных весовых коэффициентов $V(k)$ принадлежат интервалу от 0 до 1, а решение с наивысшим $V(k)$ — оптимальное.

Для решения задач с использованием МАИ разработаны различные программные продукты, требующие применения подходов матричной алгебры и достаточно высокой квалификации пользователей (в некоторых вариантах программной реализации рассматриваемого метода предусмотрена возможность ввода мнений экспертов с помощью устройств удаленного введения и обработки оценок). Выбор оптимальных решений по данному методу может быть осуществлен, например, с помощью программы "MPRIORITY 1.0" [9] и других электронных ресурсов. В некоторых работах предлагается реализация МАИ с использованием только библиотечных функций MS Excel, однако такой подход не обеспечивает полной автоматизации вычислений и не позволяет проводить анализ устойчивости полученных результатов [10]. Если в оптимизационных задачах используются однозначные количественные и/или качественные критерии оценки, то матрицы сравнения элементов иерархии можно не вводить [11, 12]. Тогда вычислительные процедуры значительно упрощаются.

В рассматриваемой АИС используется компьютерная программа, предназначенная для реализации наиболее простого алгоритма МАИ, основанного на расчетах весовых коэффициентов по формулам (1)–(3), адекватного поставленным задачам и не требующего применения методики парных сравнений для определения рейтинга значимости элементов иерархической структуры. Программа написана на языке программирования VBA (Visual Basic for Application) для приложения MS Excel 2010.

3. Вычислительный эксперимент

Апробация разработанной ИС была осуществлена для источников энергии, которые в настоящее время либо активно используют в различных авиатранспортных средствах, либо рассматривают возможности замещения ими традиционного авиационного топлива. Комплексный сравнительный анализ их преимуществ и недостатков в сфере обеспечения техносферной и экологической безопасности

позволил сформировать базу данных о ключевых критериях оценки изучаемых объектов с указанием рейтинга значимости каждого из них и о показателях оценки источников энергии по критериям.

На рис. 1 (см. третью сторону обложки) изображено рабочее окно компьютерной программы АИС, в котором приведены характеристики ИЭ по критериям, показатели абсолютной значимости критериев по шкале от 0 до 10 с учетом задач по обеспечению экологической и техносферной безопасности и результаты расчетов итоговых весовых коэффициентов оцениваемых объектов методом анализа иерархий.

Перед началом работы с программой следует заполнить соответствующие столбцы таблицы наименованиями критериев оценки источников энергии, указав для каждого критерия параметр m и весовой коэффициент, определяющий его абсолютную значимость. Далее следует ввести абсолютные значения показателей оценки источников энергии (ИЭ) по каждому из критериев, порядковый номер критериев определяется автоматически. В случае некорректного ввода информации в ходе работы программы будут появляться предупреждающие сообщения. Следует отметить, что если для критерия $m = -1$, то абсолютные значения показателей оценки решений по нему $Q(i, k)$ согласно формуле (2) не должны быть равны 0. В программе предусмотрена защита вычислений в случае некорректного ввода нулевых значений $Q(i, k)$ при $m = -1$: при этом вместо 0 автоматически вводится очень маленькое положительное число.

В пользовательском интерфейсе предусмотрены пять кнопок управления программным продуктом. После нажатия на кнопку "Пуск" появляются диалоговые окна, в которых необходимо задать число источников энергии и число критериев оценки (техническое ограничение для их числа в данном варианте программы — 100). Далее в автоматическом режиме проводятся необходимые вычисления, и рассчитанные суммарные весовые коэффициенты ИЭ отображаются в правых верхних ячейках таблицы. Рядом с кнопкой "Пуск" имеются вспомогательные кнопки, предназначенные для создания резервной копии данных на отдельном листе Excel ("Резерв"), для восстановления данных ("Из резерва") и две кнопки очистки (очистка только последних введенных значений ("Очист. знач.") и полная очистка таблицы ("Очист. все"). Основные отличия разработанной программы от имеющихся аналогов заключаются в реализации в ней полной автоматизации процесса вычислений и в отсутствии требований к наличию у поль-

<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 5px; text-align: center;">ПУСК</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 15px; padding: 5px; text-align: center;">В резерв</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 15px; padding: 5px; text-align: center;">Из резерва</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 5px; text-align: center;">RC</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 5px; text-align: center;">AC</div> </div>					0,438		0,562	
№	Критерии оценки источников энергии	Параметр <i>m</i> (если лучший выбор — "минимум для абс. значения", то -1, иначе 1)	Весовой коэф. критерия (от до 10)	Норм. весовой коэф. критерия	Виды источников энергии			
					Керосин		Солнечные батареи	
					Абс. знач.	Вес. коэф.	Абс. знач.	Вес. коэф.
1	Критерий 1	1	10	0,0375	0,1	0,0099	10	0,9901
2	Критерий 2	1	5	0,0187	10	0,6667	5	0,3333
3	Критерий 3	1	10	0,0375	10	0,5000	10	0,5000
4	Критерий 4	1	5	0,0187	2	0,1818	9	0,8182
5	Критерий 5	1	7	0,0262	0	0,0000	10	1,0000
6	Критерий 6	1	5	0,0187	10	0,9091	1	0,0909
7	Критерий 7	1	5	0,0187	10	0,7692	3	0,2308
8	Критерий 8	1	10	0,0375	2,5	0,6250	1,5	0,3750
9	Критерий 9	1	10	0,0375	10	0,9995	0,0005	0,0005
10	Критерий 10	1	10	0,0375	10	0,6667	5	0,3333
11	Критерий 11	1	10	0,0375	10	0,6667	5	0,3333
12	Критерий 12	1	10	0,0375	10	0,6667	5	0,3333
13	Критерий 13	-1	7	0,0262	1	0,8333	5	0,1667
14	Критерий 14	-1	7	0,0262	1	0,8333	5	0,1667
15	Критерий 15	1	8	0,0300	2,5	0,4545	3	0,5455
16	Критерий 16	-1	10	0,0375	1	0,9091	10	0,0909
17	Критерий 17	1	10	0,0375	5	0,3333	10	0,6667
18	Критерий 18	1	10	0,0375	8	0,6154	5	0,3846
19	Критерий 19	1	10	0,0375	8	0,6154	5	0,3846
20	Критерий 20	-1	8	0,0300	5	0,1667	1	0,8333
21	Критерий 21	1	5	0,0187	10	0,6667	5	0,3333
22	Критерий 22	1	10	0,0375	0	0	10	1
23	Критерий 23	1	10	0,0375	1	0,1	9	0,9
24	Критерий 24	-1	10	0,0375	10	1E-04	0,001	0,9999
25	Критерий 25	1	10	0,0375	0	0	10	1
26	Критерий 26	-1	5	0,0187	8	0,1111	1	0,8889
27	Критерий 27	1	5	0,0187	1	0,1	9	0,9
28	Критерий 28	1	10	0,0375	5	0,3333	10	0,6667
29	Критерий 29	-1	10	0,0375	1	0,8333	5	0,1667
30	Критерий 30	1	5	0,0187	0	0	10	1
31	Критерий 31	1	5	0,0187	0	0	10	1
32	Критерий 32	1	5	0,0187	10	0,9091	1	0,0909
33	Критерий 33	1	10	0,0375	0	0	10	1

Рис. 2. Результаты расчетов итоговых весовых коэффициентов керосина (0,438) и солнечных батарей (0,562) с помощью АИС, предназначенной для оценки эколого-экономических и эколого-технических преимуществ источников энергии для ЛА по МАИ

зователей знаний основ линейной алгебры и особенностей работы со встроенными функциями табличного процессора Excel.

На рис. 2 представлены результаты сравнительной оценки эколого-экономических и эколого-технических преимуществ использования керосина и солнечных батарей в небольших турбовинтовых самолетах, полученные с помощью разработанной АИС. Для анализа были использованы наиболее значимые для РФ критерии оценки, перечень которых указан в табл. 2.

Для МАИ, как и для других оптимизационных методов, важным критерием оценки найденного решения является его устойчивость при изменениях вводимых параметров, которые могут быть неточно заданы или подвержены влиянию субъективных факторов. Поэтому для проверки устойчивости полученных результатов было проведено 20 разыгрываний исходных данных модели на основе метода статистических испытаний, реализованного с помощью встроенного в VBA генератора случайных чисел [19–21]. Все вводимые параметры варьировались случайным образом в пределах 30 % от исход-

Таблица 2

Критерии оценки эколого-экономических и эколого-технических преимуществ использования керосина и фотоэлементов в небольших турбовинтовых самолетах*

№ критерия	Наименование
1	Обеспеченность сырьем для производства источника энергии
2	Отсутствие зависимости производства ИЭ от импорта сырья и/или оборудования
3	Возможность бесперебойного снабжения производства ИЭ сырьем
4	Удобство транспортировки источника энергии
5	Возможность замещения традиционных ископаемых энергоносителей при использовании источника энергии
6	Степень освоенности технологии производства и/или преобразования энергии источника и ее доступность
7	Наличие серийного производства оборудования для преобразования энергии источника
8	КПД процесса переработки энергии источника
9	Возможность использования ИЭ в технике большой мощности
10	Возможность использования источника энергии для энергоснабжения двигателя ЛА и систем бортового питания
11	Возможность использования ИЭ на различных стадиях полета
12	Разнообразии ЛА, в которых можно использовать источник энергии
13	Необходимость использования больших площадей и объемов для преобразования энергии источника
14	Необходимость использования большого количества вспомогательной техники при эксплуатации ИЭ
15	Срок службы двигателя ЛА, использующего источник энергии
16	Зависимость эффективности работы двигателя ЛА от погодных условий и климата
17	Возможность обеспечения высокой надежности работы двигателя и систем бортового питания

№ критерия	Наименование
18	Способность обеспечивать непрерывное энергоснабжение двигателя и систем бортового питания
19	Возможность прогнозировать и планировать переработку энергии источника
20	Воспламеняемость
21	Наличие научно-технических разработок для развития технологии преобразования энергии источника
22	Возобновляемость ресурсов для получения и/или эксплуатации ИЭ
23	Безопасность производства и использования источника энергии
24	Объемы выбросов загрязняющих веществ при использовании ИЭ
25	Сокращение выбросов парниковых газов и других загрязнителей ОС при использовании источника энергии
26	Уровень шума двигателя, использующего источник энергии
27	Ресурсосбережение и возможность осуществлять рациональное природопользование
28	Доступность источника энергии
29	Стоимость сырья и оборудования для производства источника энергии
30	Рост экспорта традиционных энергоресурсов при использовании ИЭ
31	Независимость от цен на топливо и его поставок
32	Наличие законодательных и финансовых механизмов поддержки производства и использования источника энергии
33	Снижение ущерба, наносимого ОС

* Источник: разработано авторами.

ного значения (в предположении равномерного распределения их возможных значений и при верхнем ограничении значений, равном 10). В результате указанной обработки были получены следующие результаты для разброса значений итоговых весовых коэффициентов керосина и солнечных батарей: $0,435 \pm 0,012$ и $0,565 \pm 0,012$ (при разыгрывании только весовых коэффициентов критериев); $0,422 \pm 0,022$ и $0,578 \pm 0,022$ (при разыгрывании не только рейтинга значимости критериев, но и абсолютных значений показателей оценки ИЭ по критериям). Погрешность результатов оценивалась по выборочным стандартным отклонениям. Полученные распределения результатов, как и следовало ожидать, оказались близкими к нормальным. Таким образом, было установлено, что первоначально полученные значения суммарных весовых коэффициентов сравниваемых ИЭ, равные 0,438 и 0,562, обладают достаточно высокой статистической достоверностью и устойчивостью.

Заключение

Особенность методики, используемой в рассмотренной АИС, заключается в сочетании в ней универсальности и предметной ориентированности. Суммарные весовые коэффициенты учитывают достоинства и недостатки авиационных технологий и материалов, и в каждом конкретном случае можно взять для расчетов наиболее важные с точки зрения экологической безопасности критерии, чтобы принять

научно обоснованное решение о том, как оптимально использовать рассматриваемые объекты исследования с учетом их конкурентных эколого-экономических и эколого-технических преимуществ. Методика позволяет осуществлять комплексную оценку технологий и материалов для авиатранспортных средств и рекомендуется для широкого практического применения.

Усовершенствование разработанной АИС можно осуществлять как в направлении увеличения числа иерархических уровней в используемом МАИ (например, целесообразно ввести в математическую модель уровень экспертов и модернизировать соответствующее ПО для ее реализации), так и в направлении расширения совокупности методов решения многокритериальной задачи о безопасности технологий и материалов для ЛА.

Список литературы

1. Сосунова И. А. Методология и методы современной социальной экологии. М.: МНЭПУ, 2010.
2. Гвоздкова И. А. Математические задачи социо-эколого-ориентированной экономики // Труд и социальные отношения. 2017. № 6. С. 73–84.
3. Гвоздкова И. А., Гвоздкова Ю. Д. Методика оценки социо-эколого-экономических преимуществ источников энергии для авиатранспорта // Экономика в условиях социально-техногенного развития мира. Матер. II Междунар. междисциплинарной науч. конф. по фундаментальным и прикладным проблемам современного социально-экономического и экономико-экологического развития (5 октября 2017 г., г. Брянск). Брянск: БГТУ, 2017. Т. 2. С. 130–134.
4. Гвоздкова Ю. Д. Многокритериальная оценка перспективных источников энергии для авиатранспорта методом анализа иерархий // 16-я Междунар. конф. "Авиация и космонавтика — 2017". 20–24 ноября 2017 г. М., 2017. С. 373–374.

5. **Гвоздкова Ю. Д.** Комплексная оценка эколого-технических преимуществ материалов для авиационных энергоустановок на основе альтернативных источников энергии // Гагаринские чтения — 2018. Сб. тезисов докл. XLIV Междунар. молодежной науч. конф. М.: Изд. МАИ (НИУ), 2018. Т. 3. С. 87—88.
6. **Саати Т. Л.** Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 316 с.
7. **Саати Т. Л.** Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети. М.: Издательство ЛКИ, 2008. 360 с.
8. **Гвоздкова И. А.** Эколого-ориентированные математические модели управления рисками и обеспечением безопасности // Вестник университета. М.: ГУУ. 2016. № 9. С. 200—207.
9. **Абакаров А. Ш., Сушков Ю. А.** Программная система поддержки принятия решений "MPRIORITY 1.0" // Электронный научный журнал "Исследовано в России", 2005. URL: <http://www.elibrary.lt/resursai/Uzsienio%20leidiniai/MFTI/2005/207.pdf> (дата обращения: 17.02.2018).
10. **Шевченко Д. В.** Метод анализа иерархий. Материалы лекции. URL: www.ieml-math.narod.ru/lect/MPUR_MAI.pdf (дата обращения: 25.05.2018).
11. **Гвоздкова И. А., Курочкин А. В.** Программная реализация математических методов в задачах оптимизации выбора безопасных продуктов питания // Экономика в условиях социально-технологического развития мира. Матер. II Междунар. междисциплинарной науч. конф. по фундаментальным и прикладным проблемам современного социально-экономического и экономико-экологического развития (5 октября 2017 г., г. Брянск). Брянск: Изд. БГТУ, 2017. Т. 1. С. 145—152.
12. **Гвоздкова И. А., Курочкин А. В.** Математическое и информационное обеспечение дистанционной занятости // Труд и социальные отношения. 2017. № 5. С. 32—44.
13. **Fang L., Xianyi G., Xin M.** On reasons of uncontrollable construction cost based on the ABC analysis method and the complete decomposition model // Systems Engineering Procedia. 2012. V. 4. P. 359—365. URL: <https://www.researchgate.net/publication/271609803> (дата обращения: 08.06.2018).
14. **Yu M.-C.** Multi-criteria ABC analysis using artificial-intelligence-based classification techniques // Expert Systems with Applications. 2011. V. 38. Iss. 4. P. 3416—3421. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S09577417410009358> (дата обращения: 08.06.2018).
15. **Шатунова Г. А., Кузьмина О. Н.** Историко-логический генезис и периодизация этапов развития функционально-стоимостного анализа // Вестник Самарского государственного экономического университета. 2012. № 4 (90). С. 91—96.
16. **Белов В. М.** Метод балльной оценки показателей коэффициентов весомости // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. 2009. № 4. С. 15—19.
17. **Шубин И. И.** Использование метода Парето для анализа и отбора инвестиционных проектов для финансирования // Матер. Междунар. научно-практ. конф. "Актуальные проблемы управления — 2006". М.: ГУУ, 2006. С. 244—247.
18. **Saaty T. L.** Relative measurement and its generalization in decision making: why pairwise comparisons are central in mathematics for the measurement of intangible factors — the analytic hierarchy/network process // RACSAM (Review of the Royal Spanish Academy of Sciences, Series A, Mathematics). 2008. N. 102 (2). P. 251—318.
19. **Кузьменко В. Г.** VBA. Эффективное использование. М.: БИНОМ, 2015.
20. **Операция** перемешивания значений — VB. URL: <http://www.cyberforum.ru/vb-net/thread359942.html> (дата обращения: 11.02.2018).
21. **L'Ecuyer P.** Random number generation // Springer Handbooks of Computational Statistics. 2007. P. 93—137.

J. D. Gvozdkova¹, Postgraduate Student, e-mail: gina94@yandex.ru,

I. A. Gvozdkova², Head of the Department, Professor, e-mail: gvozdkova@yandex.ru,

A. V. Kurochkin², Assistant Professor, e-mail: avkur2@yandex.ru,

A. V. Chernyaev¹, Professor, e-mail: alex_v_ch@bk.ru,

¹Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow

²Academy of labor and social relations, Moscow

Information System of Environmental Safety Assessment of Aviation Materials and Technologies by the Analytic Hierarchy Process

The paper considers design principles, results of testing and recommendations for the development of the automated information system (AIS) using the multi-criteria analysis of environmental benefits of aircraft technologies and materials based on the analytic hierarchy process (AHP). The use of simple AHP algorithm to solve the optimization problem and the choice of the appropriate software for its implementation is substantiated. The results of a computational experiment carried out with the help of the developed AIS to study the possibility of replacing traditional aviation fuel with alternative energy sources are presented.

Keywords: information system, environmental and technosphere safety, aviation technologies and materials, analytic hierarchy process, software, multi-criteria task, energy sources

DOI: 10.17587/it.25.185-192

References

1. **Sosunova I. A.** *Metodologija i metody sovremennoj social'noj ekologii* (Methodology and methods of modern social ecology), Moscow, MNEPU, 2010 (in Russian).

2. **Gvozdkova I. A.** *Matematicheskiye zadachi socio-ekologo-orientirovannoj ekonomiki* (Mathematical problems of socially and ecologically oriented economy), *Trud i Social'nyje Otnoshenija*. 2017, no. 6, pp. 73—84 (in Russian).

3. **Gvozdkova I. A., Gvozdkova J. D.** *Metodika ocenki socio-ekologo-ekonomicheskikh preimushchestv istochnikov energii dlya aviatransporta* (Methods of assessment of ecological and socially economic benefits of aircraft energy sources), *Ekonomika v usloviyah social'no-tehnogenogo razvitiya mira. Materialy II Mezhdunarodnoj mezhdisciplinarnoj nauchnoj konferencii po fundamental'nym i prikladnym problemam sovremennoogo social'no-ekonomicheskogo i ekonomiko-ekologicheskogo razvitiya* (Economy in terms of socio-technological development of the world. Proceedings of the II In-

ternational interdisciplinary scientific conference on fundamental and applied problems of modern socio-economic and environmental development) (5 oktyabrya 2017 g., g. Bryansk), Bryansk, BGTU, 2017, vol. 2, pp. 130–134 (in Russian).

4. **Gvozdkova J. D.** *Mnogokriterial'naja ocenka perspektivnykh istochnikov ehnergii dlya aviатransporta metodom analiza ijerarhij* (Multi-criteria assessment of promising energy sources for air transport by the analytic hierarchy process), *16-ja Mezhdunarodnaja konferencija "Aviacija i kosmonavtika — 2017"*, 20–24 november 2017, Moscow, Tezisy. Tipografija "Lyuksor", 2017, pp. 373–374 (in Russian).

5. **Gvozdkova J. D.** *Kompleksnaja ocenka ekologo-tehnicheskikh preimushchestv materialov dlya aviacionnykh ehnergoustanovok na osnove al'ternativnykh istochnikov ehnergii* (Complex assessment of ecological and technical advantages of materials for aircraft power plants based on alternative energy sources), *Gagarinskije chtenija — 2018. Sbornik tezisov dokladov XLIV Mezhdunarodnoj molodyozhnoj nauchnoj konferencii, Moscow, Moskovskij aviacionnyj institut (nacional'nyj issledovatel'skij universitet)*, 2018, vol. 3, pp. 87–88 (in Russian).

6. **Saati T. L.** *Prinyatije reshenij. Metod analiza ijerarhij* (Decision — making. Analytic hierarchy process), Moscow, Radio i svyaz', 1993, 316 p. (in Russian).

7. **Saati T. L.** *Prinyatije reshenij pri zavisimostyah i obratnykh svyazyah: Analiticheskie seti* (Decision — making at dependences and feedbacks: Analytical networks), Moscow, Izdatel'stvo LKI, 2008, 360 p. (in Russian).

8. **Gvozdkova I. A.** *Ekologo-orientirovannye matematicheskie modeli upravlenija riskami i obespechenijem bezopasnosti* (Ecological-oriented mathematical models of risk management and security), *Vestnik universiteta, Moscow, GUU*, 2016, no. 9, pp. 200–207 (in Russian).

9. **Abakarov A. Sh., Sushkov Yu. A.** *Programmnaja sistema podderzhki prinyatija reshenij "MPRIORITY 1.0"* (Software decision support system "MPRIORITY 1.0"), *Elektronnyj nauchnyj zhurnal "Issledovano v Rossii"*, 2005, available at: <http://www.elibrary.lt/resursai/Uzsienio%20leidiniai/MFTI/2005/207.pdf> (date of access: 17.02.2018) (in Russian).

10. **Shevchenko D. V.** *Metod analiza ijerarhij. Materialy lek-cii* (Analytic hierarchy process. Lecture materials), available at: www.ieml-math.narod.ru/lect/MPUR_MAI.pdf (date of access: 25.05.2018) (in Russian).

11. **Gvozdkova I. A., Kurochkin A. V.** *Programmnaya realizacija matematicheskikh metodov v zadachah optimizacii vybora bezopasnykh produktov pitanija* (Software implementation of mathematical methods in optimizing the choice of safe food), *Ekonomika v usloviyah social'no-tehnogennogo razvitiya mira. Materialy II Mezhdunarodnoj mezhdisciplinarnoj nauchnoj konferencii po fundamental'nyh i prikladnym problemam sovremennogo social'no-ekonomicheskogo i*

ekonomiko-ekologicheskogo razvitiya (Economy in terms of socio-technological development of the world. Proceedings of the II International interdisciplinary scientific conference on fundamental and applied problems of modern socio-economic and environmental development) (5 oktyabrya 2017 g., g. Bryansk), Bryansk, BGTU, 2017, vol. 1, pp. 145–152 (in Russian).

12. **Gvozdkova I. A., Kurochkin A. V.** *Matematicheskoje i informacionnoje obespechenije distancionnoj zanyatosti* (Mathematical and information means of remote employment), *Trud i social'nyje otnoshenija*. 2017, vol. 5, pp. 32–44 (in Russian).

13. **Fang L., Xianyi G., Xin M.** On reasons of uncontrollable construction cost based on the ABC analysis method and the complete decomposition model, *Systems Engineering Procedia*. 2012, vol. 4, pp. 359–365, available at: <https://www.researchgate.net/publication/271609803> (date of access: 08.06.2018).

14. **Yu M.-C.** Multi-criteria ABC analysis using artificial-intelligence-based classification techniques, *Expert Systems with Applications*. 2011, v. 38, iss. 4, pp. 3416–3421, available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417410009358> (date of access: 08.06.2018).

15. **Shatunova G. A., Kuz'mina O. N.** *Istoriko-logicheskij genezis i periodizacija etapov razvitiija funkcional'no-stoimostnogo analiza* (Historical and logical genesis and periodization of development stages of functional and cost analysis), *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta*, 2012, no. 4 (90), pp. 91–96 (in Russian).

16. **Belov V. M.** *Metod ball'noj ocenki pokazatelej koeficientov vesomosti* (Method of the weight coefficients scoring), *Vestnik FGOU VPO MGAU*, 2009, no. 4, pp. 15–19 (in Russian).

17. **Shubin I. I.** *Ispol'zovanie metoda Pareto dlya analiza i otbora investicionnykh proektov dlya finansirovaniya* (The use of Pareto method for analysis and selection of investment projects for financing), *Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Aktual'nyje problemy upravlenija — 2006"*, Moscow, GUU, 2006, pp. 244–247 (in Russian).

18. **Saati T. L.** Relative measurement and its generalization in decision making: why pairwise comparisons are central in mathematics for the measurement of intangible factors — the analytic hierarchy/network process, *RACSAM (Review of the Royal Spanish Academy of Sciences, Series A, Mathematics)*, 2008, vol. 102 (2), pp. 251–318.

19. **Kuz'menko V. G.** *VBA. Effektivnoje ispol'zovanie (VBA. Effective using)*, Moscow, BINOM, 2015 (in Russian).

20. **Operacija peremeshivaniya znachenij — VB** (Value mixing operation — VB), available at: <http://www.cyberforum.ru/vb-net/thread359942.html> (date of access: 11.02.2018) (in Russian).

21. **L'Ecuyer P.** Random number generation, *Springer Handbooks of Computational Statistics*, 2007, pp. 93–137.

Адрес редакции:

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала (499) 269-5510

E-mail: it@novtex.ru

Технический редактор *Е. В. Конова*.

Корректор *Е. В. Комиссарова*.

Сдано в набор 10.01.2019. Подписано в печать 22.02.2019. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 8,86. Заказ ИТ319. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-15565 от 02 июня 2003 г.

Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз".

119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.
