

УДК 623.45

DOI 10.51955/2312-1327_2026_1_56

РЕШЕНИЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ УТИЛИЗАЦИИ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

*Мария Евгеньевна Семерикова,
orcid.org/0009-0008-1700-2084,*

аспирант

*Московский государственный технический
университет гражданской авиации,*

Кронштадтский бульвар, д. 20

Москва, 125493, Россия

maria.semerr@yandex.ru

*Татьяна Владимировна Наумова,
orcid.org/0000-0002-4813-5081,*

доктор философских наук, доцент

*Московский государственный технический
университет гражданской авиации,*

Кронштадтский бульвар, д. 20

Москва, 125493, Россия

t.naumova@mstuca.ru

Аннотация. Отечественный авиапарк ожидает масштабное обновление в рамках программы импортозамещения, что для российской гражданской авиации создает относительно новую и актуальную проблему обращения с авиационной техникой после завершения ее эксплуатации. На текущий момент демонтаж и утилизация воздушных судов осуществляется фрагментарно и бессистемно. Четкие, научно обоснованные и нормативно закреплённые процедуры отсутствуют. Уникальность конструкции воздушных судов и особенности эксплуатации делают процессы их разуконплектования, переработки и утилизации трудоёмкими и нерентабельными. Вместе с тем растущие требования к ресурсосбережению и защите окружающей среды вынуждают искать и внедрять на заключительном этапе жизненного цикла авиатехники экологически обоснованные процедуры. В статье представлены результаты разработки теоретико-методических основ отраслевой системы обращения с авиационной техникой, выведенной из эксплуатации. Предложен алгоритм обратной логистики авиационной техники с истекшим сроком службы. Разработана методика оценки утилизируемости авиатехники. Приведено описание целевой функции результативности утилизации авиатехники, значение которой определяется решением многокритериальной задачи, учитывающей экономические, экологические, технические и социальные критерии. Обоснованы значения единичных и групповых критериев. Предложенный методический аппарат позволит выполнять технико-экономическую оценку эффективности процедур обращения с авиационной техникой с истекшим сроком службы, выбирать наиболее рациональные подходы, минимизировать экономические убытки и экологические издержки, способствовать развитию инновационных технологий переработки авиационной техники.

Ключевые слова: выведенная из эксплуатации авиационная техника; обратная логистика; интегральный показатель результативности утилизации; комплексный показатель утилизируемости; утилизация авиационной техники; авиационная техника с истекшим сроком службы (АТ с ИСС); рециклинг; экологическая безопасность; жизненный цикл воздушного судна; вторичное сырье; ресурсосбережение; демонтаж и переработка ВС.

SOLVING THE MULTI-CRITERIA TASK OF OPTIMIZING THE PROCESSES OF AIRCRAFT RECYCLING

*Maria E. Semerikova,
orcid.org/0009-0008-1700-2084,
graduate student
Moscow State Technical
University of Civil Aviation,
20, Kronshtadtsky blvd
Moscow, 125493, Russia
maria.semerr@yandex.ru*

*Tatiana V. Naumova,
orcid.org/0000-0002-4813-5081,
Doctor of Science in Philosophy, Associate Professor
Moscow State Technical
University of Civil Aviation,
20, Kronshtadtsky blvd
Moscow, 125493, Russia
t.naumova@mstuca.ru*

Abstract. The domestic aviation fleet is awaiting a large-scale upgrade as part of the import substitution program, which creates a relatively new and urgent problem for Russian civil aviation in handling end-of-life aviation equipment. Currently, the dismantling and disposal of aircraft is carried out in fragments and haphazardly. There are no clear, scientifically based and legally fixed procedures. The uniqueness of aircraft design and operational features make the processes of their disassembly, recycling and disposal labor-intensive and unprofitable. At the same time, the growing demands on resource conservation and environmental protection force us to seek and implement environmentally sound procedures at the final stage of the aircraft lifecycle. The article presents the results of the development of the theoretical and methodological foundations of the industrial system for handling decommissioned aircraft. An algorithm for the reverse logistics of end-of-life aircraft is proposed. A methodology for assessing the recyclability of aircraft has been developed. The objective function of aircraft recycling efficiency is described, the value of which is determined by solving a multi-criteria task that considers economic, environmental, technical and social criteria. The values of individual and group criteria are substantiated. The proposed methodological framework will make it possible to carry out a technical and economic assessment of the effectiveness of procedures for handling end-of-life aviation equipment, choose the most rational approaches, minimize economic losses and environmental costs, and promote the development of innovative technologies for recycling aviation equipment.

Keywords: decommissioned aviation equipment; reverse logistics; integral utilization performance indicator; comprehensive recyclability indicator; aviation equipment recycling; end-of-life aviation equipment; recycling; environmental safety; aircraft lifecycle; secondary raw materials; resource conservation; aircraft disassembly and recycling.

Введение (Introduction)

Воздушное судно (ВС), как любое транспортное средство, по истечении эксплуатационного этапа подлежит выводу из эксплуатации. Дальнейшее обращение с такой техникой для отечественной гражданской авиации становится актуальной проблемой, обусловленной предстоящей модернизацией флота ВС, а также необходимостью сокращения экономических и экологических издержек.

Авиационная техника (АТ) обладает уникальными характеристиками, обусловленными особенностями конструкции ВС и специфическими условиями

использования. В конструкции и оснащении современного самолёта используются не только ценные материалы (золото, серебро, титан, алюминий), но и инновационные многокомпонентные соединения со специфическими физико-химическими свойствами, которые усложняют процессы разукрупнения, переработки и утилизации авиационной техники с истекшим сроком службы (АТ с ИСС). Зарубежный опыт показывает, что утилизация авиационной техники становится специализированной сферой техногенной деятельности [Семерикова и др., 2025б]. В России, несмотря на наличие нормативных актов, отсутствует подобная отраслевая система. Это приводит к эпизодичности и неупорядоченности утилизационных процедур.

Материалы и методы (Materials and methods)

В данном исследовании предлагается теоретико-методическое обоснование разработки и функционирования системы утилизации АТ с ИСС, удовлетворяющей природоохранным, экономическим и организационным стандартам.

Теоретическую и методологическую базу исследования составили: концепция жизненного цикла, интерпретированная применительно к авиационной технике; сравнение и анализ; методология системной динамики; теория управления; методы имитационного моделирования; методология алгоритмизации и логико-математическая интерпретация процессов.

Оценка утилизируемости выполнена на основе иерархической системы показателей с использованием экспертных методов определения весовых коэффициентов и многокритериального подхода к оптимизации решений.

Дискуссия (Discussion)

В последние десятилетия авиастроение переходит от алюминиевых конструкций к композитным материалам, усложняя демонтаж и утилизацию воздушных судов (ВС) [Кириченко и др., 2016]. Это привело к развитию специализированной отрасли обращения с авиатехникой. На международном уровне разрабатываются подходы на основе принципов обратной логистики и устойчивого развития.

Ключевые игроки, такие как Airbus и Ассоциация по утилизации авиационного парка (AFRA), формируют стандарты [Papadaki et al., 2025]. Проект PAMELA показал возможность переработки до 85% массы ВС. AFRA разработала руководство BMP 5.0 для экологически безопасного демонтажа и утилизации.

Международный опыт включает трёхэтапную модель утилизации: вывод из эксплуатации, демонтаж и сортировка материалов [Current Practices..., 2025]. Внедрение передовых технологий позволяет достигать переработки до 95% массы ВС.

Результаты (Results)

Опираясь на некоторые концептуальные подходы к обращению с выведенной из эксплуатации техникой [Концепция утилизации..., 2021; Кузнецова и др., 2015; Лесконог, 2012], в данном исследовании под обратной логистикой понимается последовательность организационно-управленческих и производственно-технологических процедур, обеспечивающих переработку, восстановление или утилизацию АТ с ИСС. Это совокупность производственных процессов (повторное использование отходов для создания продукции и получения иных полезных продуктов) [Семерикова и др., 2025a] и технологических процессов (комплекс взаимосвязанных операций, направленных на безопасное и ресурсосберегающее обращение с отходами техники). Систематизация процедур утилизации АТ с ИСС в контексте парадигмы обратной логистики представлена на рисунке 1.

Начальный этап работы включает два основных поста: приёмки и диагностирования, а также демонтажа агрегатов¹. АТ и ИСС направляется на временное хранение в специализированные ангары, стоянки или полигоны с целью подготовки к процессу утилизации. Далее АТ проходит этапы диагностики, обеззараживания и удаления газообразных субстанций, утилизацию остатков топлива и технических жидкостей, таких как масло, охлаждающие жидкости, омыватели, гидравлические жидкости и другие, уничтожение пиропатронов катапультирования. По завершении данных процедур выделяются три основные группы компонентов: горюче-смазочные материалы (ГСМ), подлежащие рециклингу; агрегаты и материалы, подлежащие демонтажу; опасные вещества, подлежащие утилизации [Афонасьев и др., 2022; Recycling..., 2022]. В ходе реализации следующего этапа осуществляется демонтаж вспомогательного технологического оборудования, включая провода, силовые устройства приводов шасси, элеронов, закрылков и рулей управления [Karagoz et al., 2020]. Также производится демонтаж электронных устройств, пластиковых обшивок, драгоценных металлов, авиационных сплавов и др. После этого корпус судна разрезается на фрагменты и сортируется.

¹ Смирнов Н. Н. Основы теории технической эксплуатации летательных аппаратов : учебник / Н. Н. Смирнов, Ю. М. Чинючин. М.: Московский государственный технический университет гражданской авиации, ООО «Издательско-полиграфическое предприятие «ИНСОФТ»», 2015. 579 с.

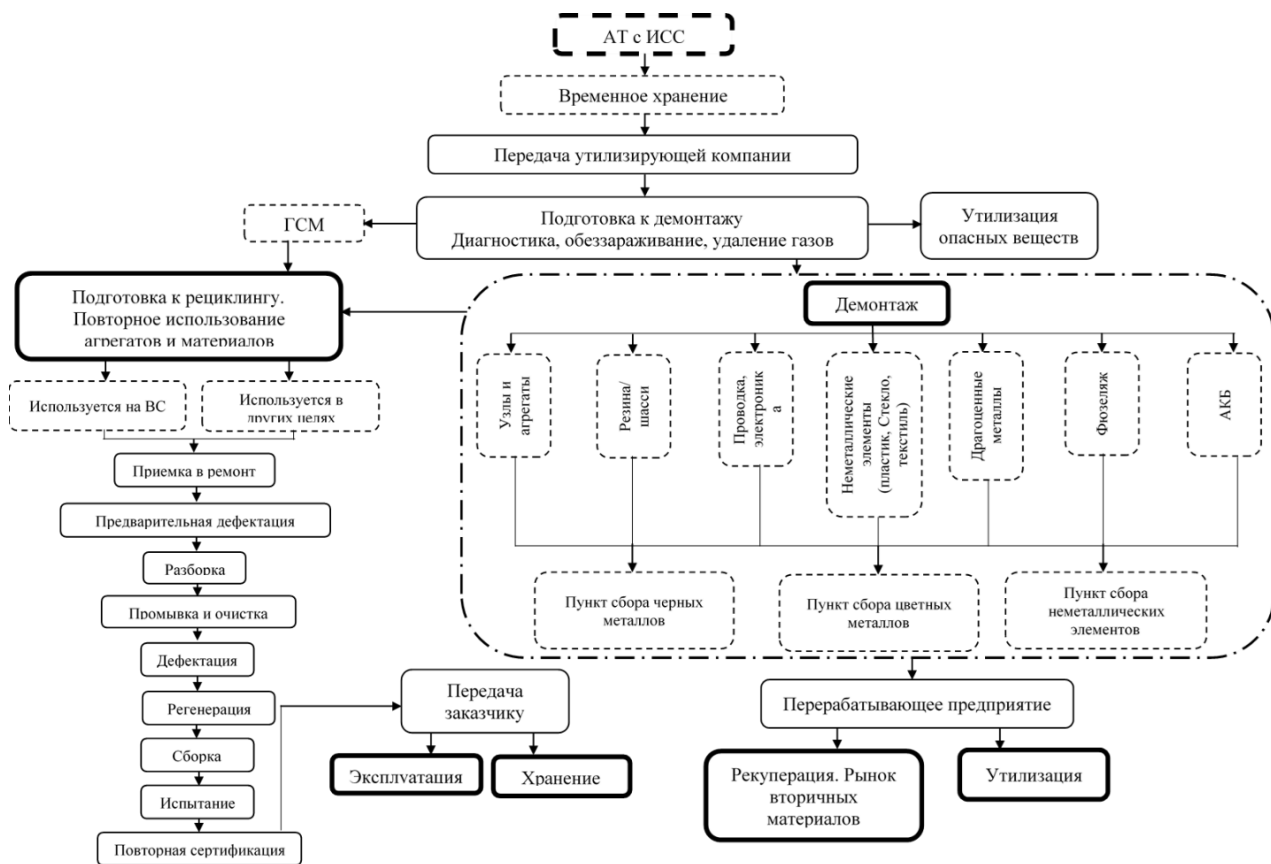


Рисунок 1 – Обратная логистика авиационной техники с истекшим сроком службы

Для принятия оптимальных решений и выбора конкретных процедур обратной логистики предлагается методика оценки утилизируемости авиатехники, схематичная интерпретация которой представлена на (рис. 2).

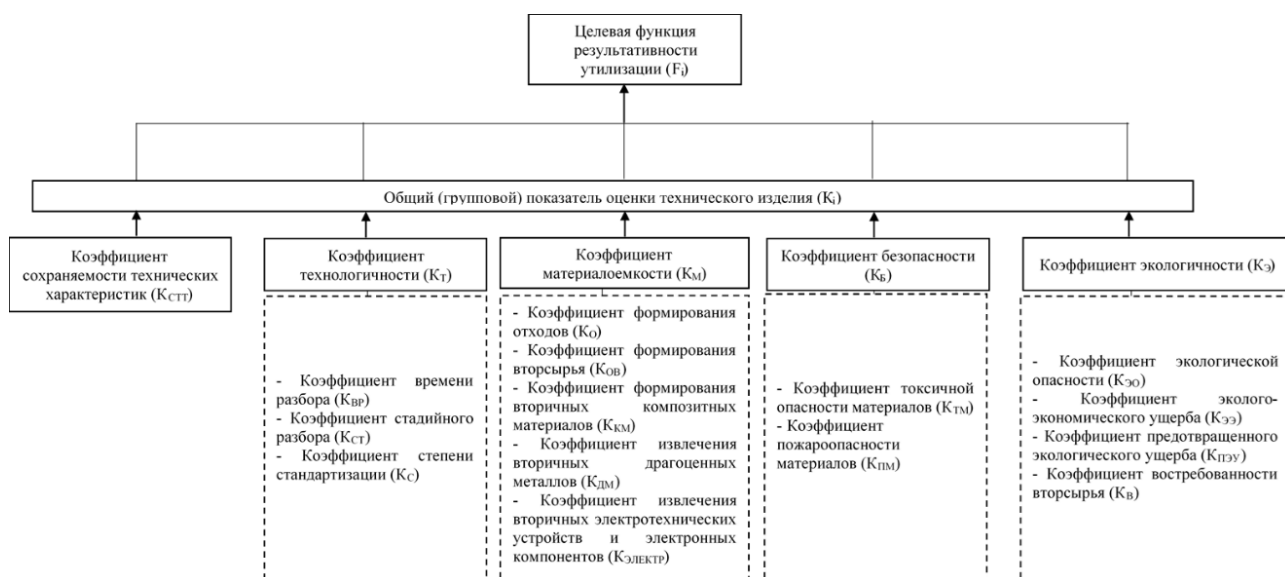


Рисунок 2 – Методика определения целевой функции результативности утилизации АТ

Схема имеет иерархическую структуру с групповыми показателями, формируемыми из единичных (индивидуальных). Анализ нормативных требований, научных исследований и опыта других отраслей транспорта выявил необходимость использования набора единичных показателей, поскольку они отражают ключевые свойства объектов, минимизируют субъективность и учитывают сложность утилизации [Акулова, 2014; Методика обоснования..., 2017; Определение степени..., 2016]. Для обобщенной оценки разработаны групповые показатели, учитывающие взаимодействие единичных и определяющие техническое состояние объектов и приоритеты утилизации – степень восстановления материалов, рециклинг, энергоемкость, эффективность использования ресурсов и оборудования. Эти параметры оценивают техническую, экономическую и экологическую целесообразность утилизации.

Формализация вычислений единичных показателей представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристика единичных показателей

Единичный коэффициент	Расчетная формула	Комментарий
Коэффициент сохраняемости технических характеристик (К _{СТТ})	$K_{СТТ} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n Q_j$	<i>n</i> – параметры утилизации; <i>Q_j</i> – степень отклонения <i>j</i> -й характеристики.
Коэффициент технологичности (К_Т)		
Коэффициент времени разбора (К _{ВР})	$K_{ВР} = \frac{1}{n} \cdot \frac{t_{НОРМ}}{t_{ФАКТ}}$	<i>n</i> – специалисты, проводящие разбор, чел.; <i>t_{НОРМ}</i> – нормативное время на разборку, ч; <i>t_{ФАКТ}</i> – среднее время на разборку, ч.
Коэффициент стадийного разбора (К _{СР})	$K_{СР} = 1 - \frac{C-1}{C}$	<i>C</i> – количество стадий разбора.
Коэффициент степени стандартизации (К _С)	$K_{С} = \frac{n_{СТ}}{n_{СТ} + n_{НЕСТ}}$	<i>n_{СТ}</i> – количество стандартных компонентов, ед.; <i>n_{НЕСТ}</i> – количество нестандартных комплектующих, ед.

Коэффициент материалоемкости (К_М)		
Коэффициент формирования отходов (К _О)	$K_O = \frac{m_{ОТХ}}{m_{ОБЦ}}$	$m_{ОТХ}$ – масса не перерабатываемых твердых отходов, кг; $m_{ОБЦ}$ – общая масса материалов, кг.
Коэффициент формирования вторсырья (К _{ОВ})	$K_{ОВ} = \frac{m_{ВГ}}{m_{ОБЦ}}$	$m_{ВГ}$ – масса используемых вторичных материалов, кг; $m_{ОБЦ}$ – общая масса материалов, кг.
Коэффициент формирования вторичных композитных материалов (К _{КМ})	$K_{КМ} = \frac{m_{КМ}}{m_{ОБЦ}}$	$m_{КМ}$ – масса используемых вторичных композитных материалов, кг; $m_{ОБЦ}$ – общая масса материалов, кг.
Коэффициент извлечения вторичных драгоценных металлов (К _{ДМ})	$K_{ДМ} = \frac{m_{ДМ}}{m_{ОБЦ}}$	$m_{ДМ}$ – масса используемых драгметаллов, кг; $m_{ОБЦ}$ – общая масса материалов, кг.
Коэффициент извлечения вторичных электротехнических устройств и электронных компонентов (К _{ЭЛЕКТР})	$K_{ЭЛЕКТР} = \frac{m_{ЭЛЕКТР}}{m_{ОБЦ}}$	$m_{ЭЛЕКТР}$ – масса используемых электронных компонентов, кг; $m_{ОБЦ}$ – общая масса материалов, кг.
Коэффициент безопасности (К_Б)		
Коэффициент токсичной опасности материалов (К _{ТМ})	$K_{ТМ} = \frac{R + S + T}{P + Q + R + S + T}$	P, Q, R, S, T – перечень материалов, различных классов опасности, кг
Коэффициент пожароопасности материалов (К _{ПМ})	$K_{ПМ} = \frac{m_{Г} + m_{Ж} + m_{Т}}{m_{ОБЦ}}$	$m_{Г}, m_{Ж}, m_{Т}$ – масса горючих материалов в различных

		агрегатных состояниях, кг
Коэффициент экологичности (Кэ)		
Коэффициент экологической опасности (Кэо)	$K_{ЭО} = \sum_{i=1}^n (N_i \cdot K_i) \cdot K_L$	<p>n – количество экологических показателей;</p> <p>N_i – отношение фактического и нормального значения показателя;</p> <p>K_i – коэффициент весомости;</p> <p>K_L – коэффициент локальной экологической ситуации местности.</p>
Коэффициент эколого-экономического ущерба (Кээ)	$K_{ЭЭ} = H \cdot d \cdot (K_{II} - 1) \cdot K_{Ц} \cdot K_{Э}$	<p>H – платежи за выбросы загрязняющих веществ, тыс. руб.;</p> <p>d – доля техники, не соответствующей нормативным требованиям;</p> <p>K_{II} – коэффициент превышения предельно допустимых выбросов;</p> <p>$K_{Ц}$ – коэффициент изменения цен за загрязнение атмосферного воздуха;</p> <p>$K_{Э}$ – коэффициент экологической значимости территории.</p>
Коэффициент предотвращенного экологического ущерба (Кпэу)	$K_{ПЭУ} = \left[\sum_{K=1}^K Y_{PP}^a + \sum_{K=1}^K Y_{PP}^B + \sum_{K=1}^K Y_{PP}^G + \sum_{K=1}^K Y_{PP}^H + \sum_{K=1}^K Y_{ДР} - \sum_{j=1}^j Y_{НУ} \right] \cdot K^{ЭС}$	<p>$Y_{PP}^a, Y_{PP}^B, Y_{PP}^G, Y_{PP}^H$ – оценка стоимостных величин предотвращенных ущербов природных</p>

		<p>ресурсов, тыс. руб.;</p> <p>$U_{др}$ – иной предотвращенный ущерб, тыс. руб.;</p> <p>K – направление деятельности природоохранных органов;</p> <p>j – вид природного ресурса;</p> <p>U_{HV} – несостоявшийся ущерб, связанный с сокращением уровня загрязнения, тыс. руб.;</p> <p>$K^{эс}$ – корректировочный коэффициент состояния территории</p>
<p>Коэффициент востребованности вторсырья (K_B)</p>	$K_B = M_{товар} \cdot H_{товар} - M_{утил}$	<p>$M_{товар}$ – масса товаров и упаковки;</p> <p>$H_{товар}$ – установленный норматив утилизации отходов от использования товаров;</p> <p>$M_{утил}$ – масса использованных отходов и вторичного сырья при производстве товаров.</p>

Поскольку ключевым содержанием методики является экологический компонент, то в формулу оценки коэффициента экологической опасности предлагается ввести дополнительный параметр – коэффициент локальной экологической ситуации географического места утилизации, учитывающий экологические факторы (состояние атмосферного воздуха, почвы, воды) по территориям экономических районов Российской Федерации. Данный коэффициент определяется в соответствии с Постановлением Правительства

№ 344². Важно отметить, что с 22 сентября 2016 года указанные нормы были отменены. Однако, поскольку иных показателей в нормативной литературе не закреплено, в рамках данного исследования для более точной оценки экологической специфики регионов предлагается эти коэффициенты учитывать.

Коэффициенты весомости (K_i) экологических параметров для авиационной техники, представленные в таблице 2, были установлены на основе анализа различных исследований экологической безопасности авиационных систем [Мисун и др., 2005].

Таблица 2 – Коэффициенты весомости экологического показателя

Значение K_i	Экологические показатели										
	Концентрация в отработавших газах (ОГ) оксида углерода (СО)	Концентрация в ОГ углеводородов (С _x Н _y)	Концентрация в ОГ оксидов азота (NO _x)	Дымность ОГ	Утечка топлива	Утечка моторного масла	Утечка трансмиссионного масла	Утечка гидравлического масла	Механическое воздействие на почву	Шум	Вибрация
	0,015	0,014	0,159	0,026	0,023	0,027	0,029	0,034	0,332	0,12	0,221

При расчёте коэффициента экологической опасности предлагается классифицировать технику по классам экологической безопасности, основываясь на ранее предложенных классах опасности.

Стоимостные оценки величин предотвращенных ущербов для расчета $K_{пэу}$ установлены на основании методики по охране окружающей среды³.

Балл экологического состояния (БЭС) – интегральный индекс качества природных ресурсов, который учитывает наиболее значимые загрязняющие вещества⁴, определяется по формуле:

$$БЭС = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{c_i}{ПДК_i}, \quad (1)$$

где n – число веществ, по которым имеются превышения предельно допустимых концентраций;

² Постановление Правительства РФ от 12 июня 2003 г. № 344 «О нормативах платы за выбросы в атмосферный воздух загрязняющих веществ стационарными и передвижными источниками, сбросы загрязняющих веществ в поверхностные и подземные водные объекты, в том числе через централизованные системы водоотведения, размещение отходов производства и потребления». Приложение №2 к постановлению Правительства РФ от 12 июня 2003 г. №44 (с изменениями от 24 декабря 2014 г.).

³ Государственный комитет Российской Федерации по охране окружающей среды // «Временная методика определения предотвращенного экологического ущерба». г. Москва, 1999 год.

⁴ Назаров Н. Г. Экологическая оценка территории: учебно-методическое пособие по дисциплине «Экологическая оценка территории» / Н. Г. Назаров, О. В. Палагушкина. Казань: КФУ, 2023. 46 с.

c_i – средний показатель концентрации i -го вещества за выбранный временной интервал;

$ПДК_i$ – предельно допустимая концентрация i -го вещества.

В зависимости от величины БЭС территории подразделяют на категории для определения корректировочного коэффициента общего объема предотвращенного экологического ущерба (табл. 3).

Таблица 3 – Корректировочный коэффициент состояния природно-территориального комплекса

Балл экологического состояния	Категория нарушенности территорий	Корректировочный коэффициент ($K^{эс}$)
< 1	Ненарушенные	3
от 1 до 2	Слабо нарушенные	2,5
от 2 до 3	Средне нарушенные	2
от 3 до 4	Сильно нарушенные	1,5
от 4 до 5	Чрезвычайно нарушенные	1
Более 5	Катастрофически нарушенные	0,5

Критерий востребованности вторичного сырья (K_B) отражает степень его значимости для производства новой продукции из отходов потребления товаров. С 1 января 2025 года критерий востребованности вторичного сырья (K_B) определяется на основе данных о массе произведенных на территории Российской Федерации товаров и упаковки, а также о массе использованных отходов и вторичного сырья для производства товаров и упаковки юридическими лицами и индивидуальными предпринимателями, осуществляющими деятельность по утилизации отходов. Эти данные должны быть представлены в единой федеральной государственной информационной системе учета отходов.

Показатель востребованности вторичного сырья выражается в относительных единицах для каждой группы товаров и упаковки, включенных в перечень товаров и упаковки, подлежащих утилизации, согласно Постановлению Правительства Российской Федерации от 29.12.2023 № 2414⁵. Значение показателя определяется по специальной формуле, описанной в ПП РФ № 2392⁶:

⁵ Постановление Правительства РФ от 29 декабря 2023 г. № 2414 «Об утверждении перечней товаров, упаковки, отходы от использования которых подлежат утилизации, и нормативов утилизации отходов от использования товаров, упаковки».

⁶ Постановление Правительства РФ от 29 декабря 2023 г. № 2392 «Об утверждении методики расчета базовой ставки экологического сбора и применения коэффициента, учитывающего сложность извлечения отходов от использования товаров для дальнейшей утилизации, наличие технологической возможности их утилизации с учетом изменения физических, химических и механических свойств материалов при многократном использовании (с учетом возможных циклов переработки отходов от использования товаров), востребованность вторичного сырья, полученного из таких отходов, для использования при производстве товаров (продукции)».

$$K_B = M_{\text{товар}} \cdot H_{\text{товар}} - M_{\text{утил}} \quad (2)$$

где $M_{\text{товар}}$ – масса товаров и упаковки, произведенных в РФ и/или импортированных из стран, не являющихся членами Евразийского экономического союза (ЕАЭС), или из стран-членов ЕАЭС в отчетном году (в тоннах, округленных до первого десятичного знака в соответствии с математическими правилами округления);

$H_{\text{товар}}$ – установленный норматив утилизации отходов от использования товаров. Фиксированные значения норматива утилизации приведены в ПП РФ № 2414;

$M_{\text{утил}}$ – масса использованных отходов и вторичного сырья при производстве товаров юридическими лицами и индивидуальными предпринимателями, зарегистрированными в реестре субъектов утилизации отходов, за отчетный период (в тоннах с округлением до первого десятичного знака по правилам математического округления).

При определении значений j -х единичных коэффициентов i -й группы необходимо учитывать их весомость, то есть вклад в формирование общего (группового) показателя. Для этого целесообразно применять метод вычисления группового показателя с использованием следующей формулы:

$$K_i = \sum_{j=1}^n a_j K_j \quad (3)$$

где a_j – коэффициенты значимости соответствующих единичных показателей K_j , которые определяются методом экспертной оценки. При этом, коэффициенты значимости должны удовлетворять условию:

$$\sum_{j=1}^n a_j = 1 \quad (4)$$

При отсутствии группы показателей единичный коэффициент не подлежит умножению на весовой коэффициент. Таким образом, коэффициент сохраняемости технических характеристик ($K_{СТТ}$) не коррелируется с весовым коэффициентом.

Итоговое значение группового показателя оценки технического изделия (K_i) определяется следующим образом:

– Коэффициент технологичности (K_T)

$$K_T = \alpha_1 K_{BP} + \alpha_2 K_{СТТ} + \alpha_3 K_C \quad (5)$$

– Коэффициент материалоемкости (K_M):

$$K_M = \alpha_4 K_O + \alpha_5 K_{OB} + \alpha_6 K_{KM} + \alpha_7 K_{DM} + \alpha_8 K_{ЭЛЕКТР} \quad (6)$$

– Коэффициент безопасности (K_B):

$$K_B = \alpha_9 K_{TM} + \alpha_{10} K_{ПМ} \quad (7)$$

– Коэффициент экологичности ($K_Э$):

$$K_Э = \alpha_{11} K_{ЭО} + \alpha_{12} K_{ЭЭ} + \alpha_{13} K_{ПЭВ} + \alpha_{14} K_B \quad (8)$$

Абсолютное значение комплексного индикатора эффективности утилизации, характеризующего оцениваемый объект, определяется посредством формулы для расчета общего показателя утилизируемости (F):

$$F = \sum_{i=1}^n \tau_i K_i \quad (9)$$

где τ_i – коэффициенты значимости, характеризующие значимость отдельных показателей K_i , которые определяются методом экспертной оценки. При этом, коэффициенты значимости должны удовлетворять условию:

$$\sum_{i=1}^n \tau_i = 1 \quad (10)$$

Разработанные аналитические выражения для групповых показателей позволили формализовать целевую функцию утилизируемости (F):

$$F = \tau_1 K_{СТТ} + \tau_2 K_T + \tau_3 K_M + \tau_4 K_B + \tau_4 K_Э \quad (11)$$

Комплексный показатель утилизируемости (F) может быть применен для обоснования оптимальных логистических цепочек обращения с АТ с ИСС, для сравнительного анализа экологической и экономической эффективности утилизации различных типов АТ, но главным образом, для принятия решения о целесообразности утилизации конкретного ВС: от нецелесообразности утилизации при $F < 0$ до целесообразности при $F > 1$.

Разработанная методика позволяет выполнять технико-экономическую оценку эффективности процедур обращения с АТ с ИСС. Для этого предусмотрена возможность расчета технико-экономического коэффициента

($K_{ТЭ}$), отражающего соотношение затрат и результатов применяемых процедур. Математическое описание $K_{ТЭ}$ оставим за рамками данной статьи, только отметим, что сравнение полученных результатов целевой функции с технико-экономическими коэффициентами позволяет выявить оптимальные пути утилизации, способствует созданию эффективных стратегий управления авиационными активами и оптимизации последовательности этапов утилизации.

Предложенное решение многокритериальной задачи оптимизации процессов утилизации авиационной техники представляет методическую основу для последующей разработки программно-аналитического комплекса (ПАК) поддержки процедур обращения с выведенной из эксплуатации авиатехникой. Ключевым блоком ПАК является программный модуль автоматического расчёта значений целевой функции F при различных исходных параметрах и технико-экономического коэффициента $K_{ТЭ}$, позволяющего сделать заключение о целесообразности утилизации по конкретному сценарию. Для удобства визуального восприятия архитектуру программного модуля предлагается представить в следующем виде (рис. 3).

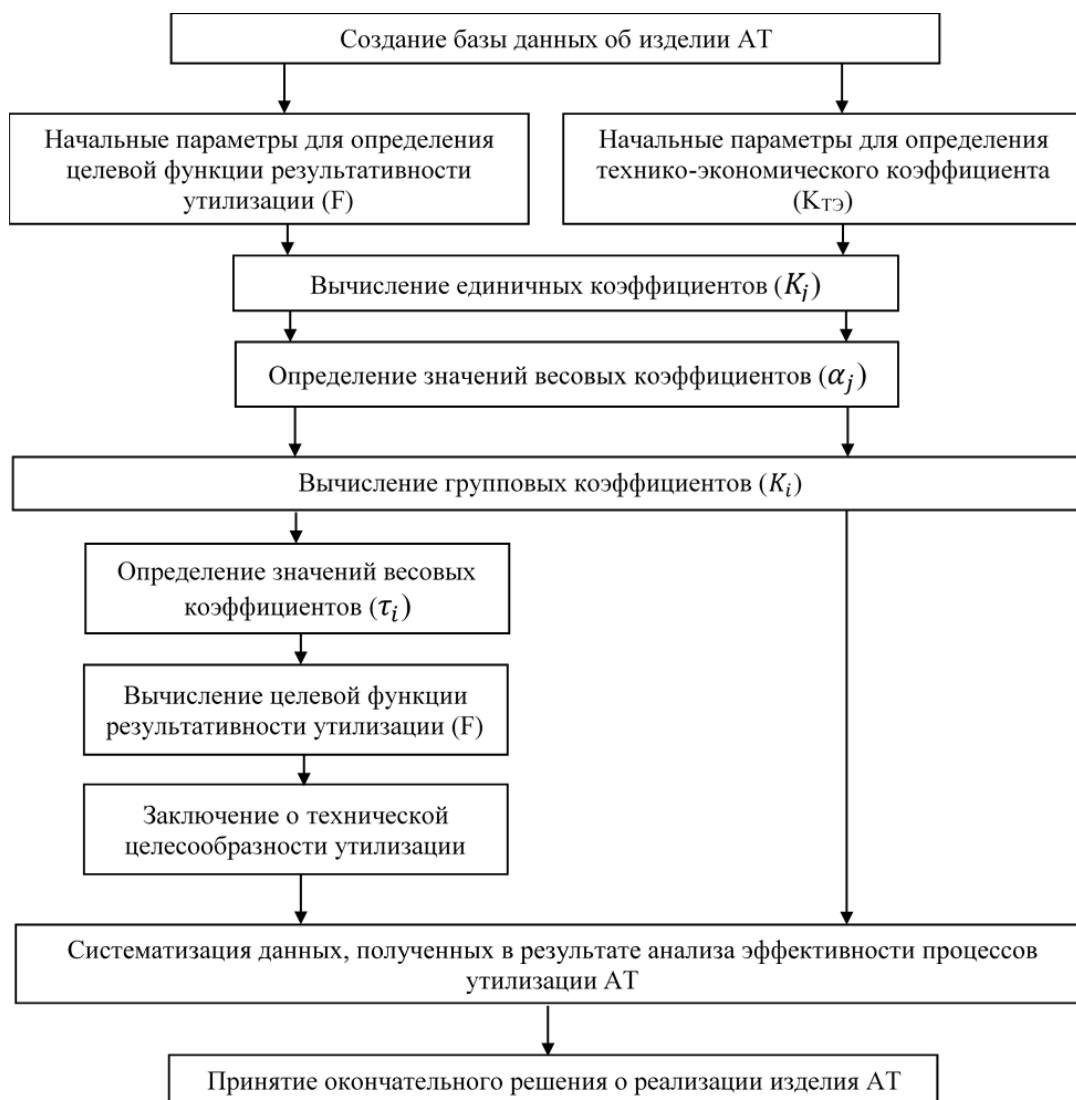


Рисунок 3 – Структурная схема решения многокритериальной задачи

Заключение (Conclusion)

В настоящее время утилизация авиационной техники носит неупорядоченный, фрагментарный характер. В условиях предстоящего интенсивного обновления отечественного парка воздушных судов по программе импортозамещения отсутствие системных, нормативно закреплённых процедур актуализирует задачу разработки теоретико-методических основ отраслевой системы обращения с авиационной техникой, выведенной из эксплуатации.

В исследовании разработана и обоснована последовательность организационно-управленческих и производственно-технологических процедур, обеспечивающих переработку, восстановление или утилизацию АТ, обозначенная как алгоритм обратной логистики.

Для выбора конкретных процедур обратной логистики и принятия оптимальных решений предложена методика оценки утилизируемости авиатехники.

Ключевым критерием методики является интегральный показатель – целевая функция результативности утилизации авиатехники (F), значение которой определяется решением многокритериальной задачи. Разработаны единичные и групповые критерии, учитывающие экономические, экологические, технические и социальные аспекты. Предложенная балльная система с безразмерными аналитическими показателями (диапазон от 0 до 1) обеспечивает удобство количественной оценки параметров и минимизирует субъективность.

Применение разработанной методики позволяет обоснованно выбирать оптимальные процедуры обращения с авиационной техникой, выведенной из эксплуатации, что способствует минимизации экономического ущерба и экологических издержек.

Библиографический список

- Акулова А. А.* Формирование рынка утилизации транспортных средств // Развитие машиностроения, транспорта, технологических машин и оборудования в условиях рыночной экономики: материалы международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию кафедры «Детали машин» ММИ УрФУ. Екатеринбург: УрФУ. 2014. С. 56-62.
- Афонасьев К. В.* Безопасное хранение и утилизация воздушных судов / К. В. Афонасьев, А. А. Трифонов // Транспорт. Экономика. Социальная сфера (Актуальные проблемы и их решения): Сборник статей IX Международной научно-практической конференции, Пенза, 14–15 апреля 2022 года. Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2022. С. 21–25. EDN OKDYTD.
- Кириченко А. С.* Перспективы и проблемы утилизации воздушного флота России / А. С. Кириченко, А. Н. Серегин // Молодой ученый. 2016. № 24(128). С. 76-81. EDN XAEDLN.
- Концепция утилизации сельскохозяйственной техники и общие принципы ее проведения / Ю. В. Катаев, В. С. Герасимов, В. И. Игнатов, Н. К. Баулин // Технический сервис машин. 2021. № 3(144). С. 72-81. DOI 10.22314/2618-8287-2021-59-3-72-81. EDN JXJIWX.
- Кузнецова Е. Ю.* Организация процесса утилизации в российском автотранспортном комплексе / Е. Ю. Кузнецова, А. А. Акулова // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2015. № 4(28). С. 81-90. DOI 10.20291/2079-0392-2015-4-81-90. EDN VDMNPF.
- Лесконог Ю. А.* Анализ и обобщение информации об утилизации техники // Международный научный журнал. 2012. № 2. С. 134-137. EDN OYQXX.

Методика обоснования системы показателей утилизируемости технических средств сельскохозяйственного производства / И. Н. Кравченко, Н. В. Алдошин, Ю. А. Лесконог, Ю. А. Шамарин // *Техника и оборудование для села*. 2017. № 3. С. 32-36. EDN YHMVMN.

Мисун Л. В. Экологический контроль машин и оборудования объектов АПК / Л. В. Мисун, И. Н. Мисун // *Агропанорама*. 2005. № 2. С. 11-14.

Определение степени разборки утилизируемой техники на запасные части / Н. В. Алдошин, И. Н. Кравченко, Н. А. Лылин [и др.] // *Строительные и дорожные машины*. 2016. № 3. С. 34-41. EDN XBHLZH.

Семерикова М. Е. Концептуальная модель системы утилизации авиационной техники / М. Е. Семерикова, Т. В. Наумова // *Гражданская авиация: XXI век : Сборник материалов XVII Международной молодежной научной конференции, посвященной 80-летию Победы в Великой Отечественной Войне, 90-летию Ульяновского института гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева*. В 2-х частях, Ульяновск, 17–18 апреля 2025 года. Ульяновск: Ульяновский институт гражданской авиации им. Главного маршала авиации Б.П. Бугаева, 2025а. С. 182-183. EDN CRIGRV.

Семерикова М. Е. Утилизация транспортных средств: российские реалии и зарубежный опыт / М. Е. Семерикова, Т. В. Наумова // *Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации*. 2025б. Т. 28, № 3. С. 63-80. DOI 10.26467/2079–0619–2025–28–3–63–80. EDN QKNZKM.

Current Practices in Recycling and Reusing of Aircraft Materials and Equipment. / M. A. Habib, B. Subeshan, Ch. Kalyanakumar [et al.] // *Materials Circular Economy*. 2025. Vol. 7, № 12. DOI 10.1007/s42824-025-00165-w. EDN OOXJMZ.

Karagoz S. End-of-life vehicle management: a comprehensive review / S. Karagoz, N. Aydin, V. Simic // *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2020. Vol. 22, № 2. P. 416–442. DOI 10.1007/S10163-019-00945-Y. EDN ENTUVB.

Papadaki D. Sustainable Practices for Aircraft Decommissioning and Recycling in a Circular Aviation Economy / D. Papadaki, E. Maleviti // *Processes*. 2025. Vol. 13. № 11. P. 3649. DOI 10.3390/pr13113649. EDN SSJWNO.

Recycling and reusing of aircraft / W. S. Khan, E. Asmatulu, Md. N. Uddin, R. Asmatulu // *Recycling and Reusing of Engineering Materials: Recycling for Sustainable Developments*. 2022. P. 233–254. DOI: 10.1016/B978-0-12-822461-8.00014-0.

References

Afonasyev K. V., Trifonov A. A. (2022). Safe storage and disposal of aircraft. *Transport. Economy. Social sphere (current problems and ways to solve them)*. 21-25. (in Russian)

Akulova A. A. (2014). Formation of the market for vehicle recycling. *Development of mechanical engineering, transport, technological machines and equipment in a market economy: proceedings of the international scientific and practical conference dedicated to the 80th anniversary of the Department of Machine Parts of the Ural Federal University*: 56-62. (in Russian)

Aldoshin N. V., Kravchenko I. N., Lylin N. A. [et al.] (2016). Determination of the degree of disassembly of recyclable machinery for spare parts. *Construction and road machinery*. 3: 34-41. (in Russian)

Habib M. A., Subeshan B., Kalyanakumar Ch. [et al.]. (2025). Current Practices in Recycling and Reusing of Aircraft Materials and Equipment. *Materials Circular Economy*. 7(12). DOI 10.1007/s42824-025-00165-w.

Karagoz S., Aydin N., Simic V. (2020). End-of-life vehicle management: a comprehensive review. *Journal of Material Cycles and Waste Management*: 22(2): 416–442. DOI 10.1007/S10163-019-00945-Y.

Kataev Yu. V., Gerasimov V. S., Ignatov V. I., Baulin N. K. (2021) The concept of recycling agricultural machinery and the general principles of its implementation. *Technical service of machines*. 3(144): 72-81. (in Russian)

- Khan W. S., Asmatulu E., Uddin Md. N., Asmatulu R. (2022). Recycling and reusing of aircraft. *Recycling and Reusing of Engineering Materials: Recycling for Sustainable Developments*. 233-254. DOI 10.1016/B978-0-12-822461-8.00014-0.
- Kirichenko A. S., Seregin A. N. (2016). Prospects and problems of utilization of the Russian air fleet. *Young Scientist*. 24(128): 76-81. (in Russian)
- Kravchenko I. N., Aldoshin N. V., Leskonog Yu. A., Shamarin Yu. A. (2017) Methodology of substantiation of the system of indicators of recyclability of technical means of agricultural production. *Machinery and equipment for rural area*. 3: 32-36. (in Russian)
- Kuznetsova E. Y., Akulov, A. A. (2015) Organization of the recycling process in the Russian motor transport complex. *Bulletin of the Ural State University of Railway Transport*. 4(28): 81-90. (in Russian)
- Leskonog Yu. A. (2012). Analysis and generalization of information on the disposal of machinery. *International Scientific Journal*. 2: 134-137. (in Russian)
- Misun L. V., Misun I. N. (2005). Environmental control of machinery and equipment at agricultural facilities. *Agropanorama*. (2): 11-14. (in Russian)
- Papadaki D., Maleviti E. (2025). Sustainable Practices for Aircraft Decommissioning and Recycling in a Circular Aviation Economy. *Processes*. 13(11): 3649. DOI 10.3390/pr13113649.
- Semerikova M. E., Naumova T. V. (2025). Vehicle recycling: Russian realities and foreign experience. *Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation*. 28(3): 63-80. (in Russian)
- Semerikova M. E., Naumova T. V. (2025). A conceptual model of the aviation equipment recycling system. *Civil Aviation: The XXI century: A collection of materials from the XVII International Youth Scientific Conference dedicated to the 80th anniversary of Victory in the Great Patriotic War, the 90th anniversary of the Ulyanovsk Institute of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation*: 182-183. (in Russian)

Поступила в редакцию	25.11.2025	Received	25.11.2025
Принята в печать	28.01.2026	Accepted for publication	28.01.2026
Опубликована	07.03.2026	Published	07.03.2026