

УДК 303.722.4:621.892

И.Н. КОВАЛЕВА, канд. техн. наук, доц.ведущий научный сотрудник лаборатории 2.1 «Механика композитов и биополимеров»¹

E-mail: innakov2@mail.ru

Л.Н. МАРЧЕНКО, канд. техн. наук, доц.заведующий кафедрой фундаментальной и прикладной математики²старший научный сотрудник³

E-mail: lmarchenko@gsu.by

В.В. ПОДГОРНАЯ, канд. физ.-мат. наук, доц.заместитель директора по научной работе¹

E-mail: podgornaya@mptri.org.by

У.А. ЗИЯМУХАМЕДОВА, д-р. техн. наук, проф.профессор кафедры материаловедения и машиностроения⁴

E-mail: umida1973@yandex.ru

¹Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси, г. Гомель, Республика Беларусь²Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины, г. Гомель, Республика Беларусь³Северо-Западный центр математических исследований имени Софьи Ковалевской, г. Псков,

Российская Федерация

⁴Ташкентский государственный транспортный университет, г. Ташкент, Республика Узбекистан

Поступила в редакцию 29.09.2025.

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ВЫБОР БАЗОВЫХ МАСЕЛ В ПРОИЗВОДСТВЕ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ FUZZY TOPSIS

Узлы трения в составе любых механизмов играют важную роль для их эффективной работы в целом. Современные механизмы представляют собой не только высокоточные, но и многокомпонентные системы, в которых подбор смазочного материала является важной задачей для разработчиков и производителей. Разработчикам необходимо учитывать свойства материалов узла трения и его функциональные возможности, нагрузки, а производителям — получить конечный продукт не только надежный, но и экономически выгодный, соответствующий запросам потребителей. Так как смазочные материалы имеют различные состав и функциональное назначение, то при их выборе необходимо использовать системный подход. В представленной работе предложена одна методология выбора базового масла на основе физико-химических свойств (критериев) по результатам физического эксперимента и нечеткого подхода. Экспериментальные данные были преобразованы в трапециевидные нечеткие числа, определены нечеткие веса критериев выбора, осуществлена процедура Fuzzy TOPSIS. Предлагаемый подход учитывает разброс экспериментальных данных и неопределенность измерений при ранжировании базовых масел по их физико-химическим свойствам.

Ключевые слова: растительные масла, животные жиры, биоразлагаемые смазочные материалы, коэффициент трения, показатель износа, энтропия, Fuzzy TOPSIS, рейтинг, загрязнение окружающей среды

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2026-1-74-81-87>

Введение. Минеральные масла в качестве смазки широко используются во многих отраслях промышленности. Однако они достаточно сложно разлагаются, поэтому их использование приводит к загрязнению окружающей среды [1–3]. В качестве альтернативы широко используются биоразлагаемые смазочные материалы, основой для

которых служат растительные масла. В условиях действующих экономических санкций вопрос импортозамещения приобрел особую значимость и стал ключевым фактором в развитии белорусской экономики. В связи с этим особенно важно найти подходящие базовые компоненты для производства экологичных смазочных материалов

внутри страны, опираясь на доступное отечественное сырье, технологии и производственные возможности. Это позволит не только расширить ассортимент смазочных материалов на внутреннем рынке, но и обеспечить переход на импортонезависимое производство [3]. Смазочные материалы обладают различными физико-химическими свойствами, что существенно влияет на их эксплуатационные характеристики [4–7]. Определение оптимального базового масла с учетом нескольких свойств представляет собой сложную многокритериальную задачу, в которой необходимо учитывать неопределенность и субъективность экспертных оценок. В работах [3, 8] используется метод TOPSIS для выбора оптимального базового масла с учетом его физико-химических и трибологических свойств, который был впервые разработан Хвангом и Юном [9] на основе следующей концепции: выбранная альтернатива должна иметь наименьшее расстояние от положительного идеального решения и наибольшее расстояние от отрицательного идеального решения в задачах выбора по нескольким критериям. Таким образом, данная альтернатива является лучшей [10]. Метод TOPSIS оценивает матрицу решений, содержащую m альтернатив, связанных с n критериями. Однако экспертные оценки таких характеристик, как кислотный состав и температура застывания, для смазочного материала часто носят неопределенный характер из-за погрешностей измерений или субъективности, что делает традиционные методы многокритериального анализа ограниченными.

Нечеткий метод TOPSIS предполагает, что матрица решений представлена трапециевидными или треугольными нечеткими числами [11], что позволяет эффективно находить оптимальные решения, комбинируя подходы теории нечетких множеств и классического TOPSIS, и включает в себя необходимый функционал для постановки задачи, сбора экспертной информации, проведения оценок и анализа результатов, визуализации индивидуальных предпочтений и групповых оценок, а также возможность выбора различных подходов к ранжированию исследуемых альтернатив.

Выбор оптимального смазочного материала является актуальной задачей для промышленности, энергетики и транспорта. Современные масла должны соответствовать множеству зачастую противоречивых критериев: обеспечивать низкий коэффициент трения, сохранять стабильность при экстремальных условиях эксплуатации, минимизировать износ узлов, обладать хорошими смазочными свойствами, иметь приемлемую стоимость, быть экологичными. Актуальность и нестандартный подход к решению рассматриваемой задачи определяет цель данного исследования.

Цель работы — ранжирование смазочных материалов с помощью нечеткого метода TOPSIS

(Fuzzy TOPSIS) на основе их физико-химических свойств для выбора растительного масла и животного жира, наиболее подходящих для создания биоразлагаемых смазочных материалов.

Материалы и методы исследований. В качестве объектов исследования рассматривались растительные масла и животные жиры. Для сравнения свойств с растительными и животными объектами использовались минеральное И-40 и синтетическое ПАО 100 масла без присадок. Выбор указанных масел и жиров обусловлен их экономической эффективностью и географической принадлежностью к Евразийскому и Азиатскому регионам. В результате физического эксперимента определены физико-химические характеристики каждого из масел. На основе результатов эксперимента требуется определить смазочный материал с оптимальными свойствами.

Для учета неопределенности, возникающей в результате эксперимента, использовался нечеткий подход, заключающийся в переходе от статистических данных к нечетким числам, в частности трапециевидным. Они лучше учитывают зону неопределенности в экспериментальных данных, имеют область максимальной правдоподобности, а не единственное значение. Трапециевидное нечеткое число $\tilde{x} = (a, b, c, d)$ характеризуется функцией принадлежности

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x < l, \\ \frac{x-l}{m-l}, & \text{если } l \leq x < m, \\ 1, & \text{если } m \leq x < n, \\ \frac{n-x}{p-n}, & \text{если } n \leq x < p, \\ 0, & \text{если } x > p, \end{cases}$$

где l и p — нижняя и верхняя границы трапеции; m и n — начало и конец ядра трапеции.

По экспериментальным данным значения l, m, n, p определяются следующим образом: l — минимальное значение в выборке; m — первый квартиль; n — третий квартиль; p — максимальное значение в выборке, учитывающее разброс экспериментальных данных и неопределенность измерений [12].

Для ранжирования смазочных материалов использовался метод Fuzzy TOPSIS. Пусть $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ — множество альтернатив, каждая из которых характеризуется относительно n критериев $C_1, C_2, \dots, C_m, C_j$ при $A \rightarrow \mathbb{R}$. Основой для метода Fuzzy TOPSIS является матрица решений $X = [\tilde{x}_{ij}]$, элементы которой характеризуют значимость критерия C_j на альтернативе A_i в виде нечетких трапециевидных чисел $\tilde{x}_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, n_{ij}, p_{ij})$ ($i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n$). Важность каждого критерия C_j определена нечетким весом $\tilde{w}_j = (q_j, s_j, t_j, u_j)$, который также определялся по эксперименталь-

ным данным методом энтропии Шеннона. Для этого на первом шаге вычислялась энтропия e_j каждого критерия и его четкий вес w_j ($j = 1, \dots, n$), который характеризует объективные веса на основе анализа разброса данных по каждому критерию: чем выше изменчивость значений, тем важнее критерий [13]. На втором шаге четкие веса w_j критериев C_j ($j = 1, \dots, n$) преобразовывали в трапециевидные нечеткие числа \tilde{w}_j с учетом того, что ядерная часть веса сосредоточена между 95 и 105 % от расчетного значения, левая и правая границы равны 90 (но не менее 0) и 110 % от веса соответственно [14]. В результате такой процедуры получили нечеткий вектор весов $\tilde{W} = [\tilde{w}_j]$ ($j = 1, \dots, n$).

Далее для ранжирования альтернатив использовался метод Fuzzy TOPSIS, который состоит из следующих шагов [15].

1. Вычисление нормализованной матрицы решений $\tilde{R} = [\tilde{r}_{ij}]$, нормализованного вектора весов $\tilde{w}_j = (\tilde{x}_j, \tilde{y}_j, \tilde{t}_j, \tilde{u}_j)$ и взвешенной нормализованной матрицы решений $\tilde{Z} = [\tilde{z}_{ij}]$, элементы которой находятся по формулам:

$$\tilde{z}_{ij} = \tilde{w}_j \odot \tilde{r}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_{ij});$$

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{l_{ij} - l_j}{\bar{p}_j - l_j}, \frac{m_{ij} - l_j}{\bar{p}_j - l_j}, \frac{n_{ij} - l_j}{\bar{p}_j - l_j}, \frac{p_{ij} - l_j}{\bar{p}_j - l_j} \right),$$

если $C_j \in K_{\max}$;

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{\bar{p}_j - p_{ij}}{\bar{p}_j - l_j}, \frac{\bar{p}_j - n_{ij}}{\bar{p}_j - l_j}, \frac{\bar{p}_j - m_{ij}}{\bar{p}_j - l_j}, \frac{\bar{p}_j - l_{ij}}{\bar{p}_j - l_j} \right),$$

если $C_j \in K_{\min}$,

где $l_j = \max_{1 \leq k \leq m} l_{kj}$; $\bar{p}_j = \max_{1 \leq k \leq m} p_{kj}$; K_{\max} — множество

максимизирующих критериев; K_{\min} — множество минимизирующих критериев; $i = 1, \dots, m$; $j = 1, \dots, n$.

2. Определение нечеткой идеальной (FPIS) $A^+ = (\tilde{z}_1^+, \tilde{z}_2^+, \dots, \tilde{z}_n^+)$ и нечеткой антиидеальной (FNIS) $A^- = (\tilde{z}_1^-, \tilde{z}_2^-, \dots, \tilde{z}_n^-)$ альтернатив, где

$$\tilde{z}_j^+ = (\max_{1 \leq k \leq m} l_{kj}, \max_{1 \leq k \leq m} m_{kj}, \max_{1 \leq k \leq m} n_{kj}, \max_{1 \leq k \leq m} p_{kj});$$

$$\tilde{z}_j^- = (\min_{1 \leq k \leq m} l_{kj}, \min_{1 \leq k \leq m} m_{kj}, \min_{1 \leq k \leq m} n_{kj}, \min_{1 \leq k \leq m} p_{kj}).$$

3. Вычисление расстояний для каждой альтернативы от векторного критерия $C(A_j)$, который задается нечетким вектором $(\tilde{z}_{i1}, \tilde{z}_{i2}, \dots, \tilde{z}_{in})$, до векторных критериев идеальной $A^+ = (\tilde{z}_1^+, \tilde{z}_2^+, \dots, \tilde{z}_n^+)$ и антиидеальной $A^- = (\tilde{z}_1^-, \tilde{z}_2^-, \dots, \tilde{z}_n^-)$ альтернатив:

$$d_i^+ = \sum_{j=1}^n \rho(\tilde{z}_{ij}, \tilde{z}_j^+);$$

$$d_i^- = \sum_{j=1}^n \rho(\tilde{z}_{ij}, \tilde{z}_j^-),$$

где $\rho(A, B)$ — метрика между нечеткими числами на основе расстояний между числовыми характеристиками нечетких чисел A и B .

4. Расчет коэффициентов относительной близости CC_i альтернатив A_i к идеальным решениям A^+ и A^- по формуле:

$$CC_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-}, \quad CC_i \in [0, 1].$$

Ранжирование альтернатив в соответствии со значениями мер близости:

$$A_i \succ A_k, \text{ если } CC_i \succ CC_k.$$

Будем рассматривать масла в качестве альтернатив A_i и физико-химические характеристики масел в качестве критериев C_j ($i = 1, \dots, 10$; $j = 1, \dots, 10$).

Алгоритм реализации разработанной методологии для ранжирования масел представлен на рисунке 1.

Результаты исследований и их обсуждение.

В качестве альтернатив рассматривались рапсовое (A_1), подсолнечное (A_2), кукурузное (A_3), пальмовое 1 (A_4), пальмовое 2 (A_5), кокосовое (A_6) масла, свиной (A_7) и говяжий (A_8) жиры, минеральное И-40 (A_9) и синтетическое ПАО 100 (A_{10}) масла.

В результате физического эксперимента, состоящего из 10 испытаний, определены следующие



Рисунок 1 — Алгоритм ранжирования смазочных масел по результатам физического эксперимента
Figure 1 — Algorithm for ranking lubricating oils based on the results of a physical experiment

щие физико-химические свойства и триботехнические характеристики рассматриваемых масел:

- показатель износа (C_1 , 40 кгс, мм), который выражает интенсивность износа поверхности: чем ниже его значение, тем лучше;
- коэффициент трения (C_2 , 1 Н), характеризующий силу сопротивления движению: меньшее трение — выше эффективность масла;
- температура вспышки (C_3 , °C), описывающая безопасность воспламеняемости: высокие значения безопаснее;
- температура застывания (C_4 , °C), которая показывает низкотемпературную текучесть: более низкие значения лучше для холодного пуска и стабильной работы при низких температурах;
- плотность (C_5 , кг/м³): для смазочных материалов более предпочтительна меньшая массовая характеристика;
- кинетическая вязкость (C_6 , мм²/с), представляющая смазывающую способность: в общем случае более высокая вязкость лучше для защиты поверхности;
- кислотное число (C_7 , мг КОН/г), которое характеризует степень окисления масла: низкие значения вызывают меньшее окисление;
- кислотный состав (процентное содержание олеиновой (C_8 , %), линолевой (C_9 , %), линоленовой

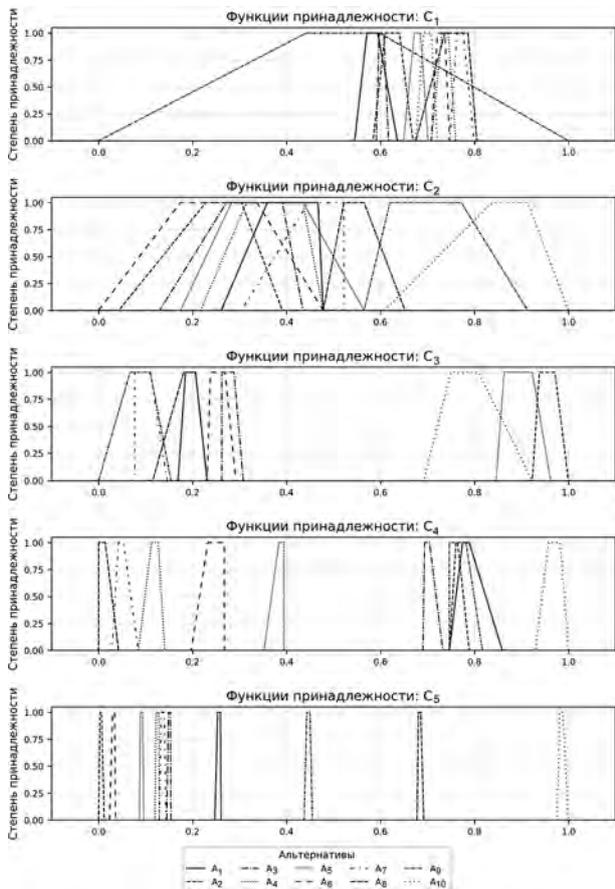


Рисунок 2 — Функции принадлежности критериев C_1 – C_5 , каждая линия — альтернатива A_1 – A_{10}
Figure 2 — Membership functions of criteria C_1 – C_5 , each line is an alternative to A_1 – A_{10}

(C_{10} , %) кислот) растительных и синтетических масел, животных жиров, которые служат основой смазочных материалов, характеризует окислительную стабильность масла: высокое содержание олеиновой, низкое содержание линолевой и линоленовой кислот характеризует окислительную стабильность смазочного материала.

По результатам эксперимента были построены нечеткие трапециевидные числа, характеризующие критерии C_1 – C_{10} для каждой альтернативы A_1 – A_{10} . Функции принадлежности этих чисел для нормированных значений представлены на рисунках 2 и 3.

Имеет место значительная вариабельность характеристик оцениваемых масел: наблюдаются как классические симметричные трапеции, так и выраженные асимметричные формы, включая случаи, близкие к треугольным функциям (когда ядро сужается до точки) и квазипрямоугольным распределениям (с минимальной зоной неопределенности). Особый интерес представляют поляризованные распределения в критериях C_9 – C_{10} , где значения альтернатив концентрируются около экстремальных точек 0 и 1, что указывает на бинарный характер оценок, в то время как критерии C_1 – C_3 демонстрируют плавные градиенты и значительное перекрытие функций принадлежности, отражающее сложность дифференциации альтернатив по этим параметрам.

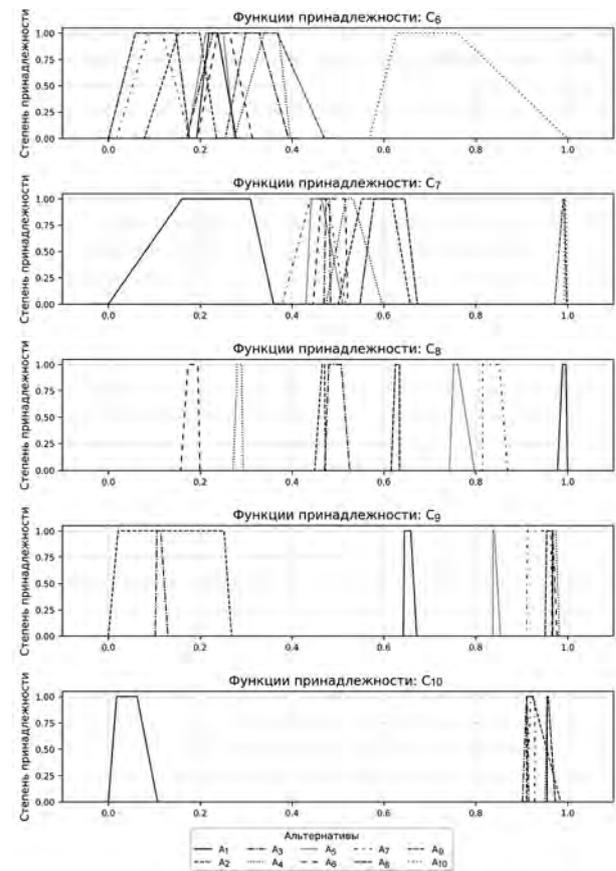


Рисунок 3 — Функции принадлежности критериев C_6 – C_{10} , каждая линия — альтернатива A_1 – A_{10}
Figure 3 — Membership functions of criteria C_6 – C_{10} , each line is an alternative to A_1 – A_{10}

Таблица 1 — Энтропия и четкие веса критериев C_1-C_{10}
 Table 1 — Entropy and clear weights of criteria C_1-C_{10}

Показатель	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}
Энтропия e_j	0,849	0,929	0,793	0,876	0,936	0,816	0,897	0,857	0,634	0,516
Вес w_j	0,080	0,037	0,109	0,065	0,034	0,097	0,054	0,076	0,193	0,255

Энтропия e_j и четкие веса w_j критериев C_j ($j = 1, \dots, 10$) приводятся в таблице 1.

Расчетные значения четких весов w_j методом энтропии для критериев оценки смазочных материалов C_1-C_{10} не только выявляют их относительную значимость на основе способности различать масла, но и находятся в тесной взаимосвязи с их физико-химическими свойствами и важностью для эксплуатационных характеристик масла. Наиболее значимыми критериями, согласно весам $w_{10} = 0,255$ и $w_9 = 0,193$ и наименьшей энтропии $e_{10} = 0,516$, $e_9 = 0,634$, являются содержание линоленовой (C_{10}) и линолевой (C_9) кислот, что полностью согласуется с их критической ролью в окислительной стабильности масла. Концентрация олеиновой кислоты (C_8 , $w_8 = 0,076$) также важна для окислительной стабильности смазочного материала, но ее вклад в различия между альтернативами оказался объективно ниже, чем у C_9 и C_{10} . Кинетическая вязкость (C_6 , $w_6 = 0,097$) показала умеренно высокую значимость и различимость ($e_6 = 0,816$). Показатель износа (C_1 , $w_1 = 0,080$) и кислотное число (C_7 , $w_7 = 0,054$), непосредственно связанные с защитой от износа (C_1) и степенью окисления (C_7), также заняли средние позиции по значимости. Их умеренно низкая энтропия ($e_1 = 0,849$, $e_7 = 0,897$) указывает на достаточную вариативность данных для различия альтернатив. Критерии низкотемпературной текучести (C_4 , $w_4 = 0,065$) и безопасности воспламеняемости (C_3 , $w_3 = 0,109$) обладают средней значимостью, при этом температура вспышки (C_3) имеет один из самых низких показателей энтропии ($e_3 = 0,793$), подчеркивая его относительную важность для различения вариантов по безопасности. Наименьшие веса ($w_5 = 0,034$ и $w_2 = 0,037$) и высочайшая энтропия ($e_5 = 0,936$ и $e_2 = 0,929$) у плотности (C_5) и коэффициента трения (C_2) означают, что данные по этим критериям были наиболее однородны среди анализируемых альтернатив.

Полученные веса используются для построения нечетких весов \tilde{w}_j и взвешенной нормализованной матрицы решений $\tilde{Z} = [\tilde{z}_{ij}]$, ($i = 1, \dots, 13$; $j = 1, \dots, 5$), по которой определяются нечеткая идеальная (FPIS) $A^+ = (\tilde{z}_1^+, \tilde{z}_2^+, \dots, \tilde{z}_{10}^+)$ и нечеткая антиидеальная (FNIS) $A^- = (\tilde{z}_1^-, \tilde{z}_2^-, \dots, \tilde{z}_{10}^-)$ альтернативы (таблица 2).

Расстояния каждой альтернативы A_1-A_{10} до идеальных значений A^+ (FPIS) и A^- (FNIS), коэффициенты относительной близости к идеальным решениям CC_i и ранги по убыванию приведены в таблице 3.

Таблица 2 — Нечеткие трапециевидные числа, характеризующих нечеткие идеальные A^+ (FPIS) и нечеткие антиидеальные A^- (FNIS) значения критериев C_1-C_{10}
 Table 2 — Fuzzy trapezoidal numbers characterizing fuzzy ideal A^+ (FPIS) and fuzzy antiideal A^- (FNIS) values of criteria C_1-C_{10}

Критерий	A^+ (FPIS)	A^- (FNIS)
C_1	(0,000; 0,033; 0,050; 0,054)	(0,053; 0,058; 0,066; 0,087)
C_2	(0,000; 0,006; 0,012; 0,016)	(0,021; 0,030; 0,036; 0,041)
C_3	(0,091; 0,097; 0,111; 0,120)	(0,000; 0,007; 0,013; 0,018)
C_4	(0,000; 0,000; 0,001; 0,003)	(0,055; 0,059; 0,067; 0,072)
C_5	(0,000; 0,000; 0,000; 0,000)	(0,030; 0,032; 0,035; 0,037)
C_6	(0,050; 0,058; 0,078; 0,107)	(0,000; 0,005; 0,012; 0,019)
C_7	(0,000; 0,008; 0,018; 0,022)	(0,049; 0,051; 0,057; 0,060)
C_8	(0,067; 0,071; 0,079; 0,083)	(0,000; 0,000; 0,000; 0,000)
C_9	(0,000; 0,004; 0,023; 0,028)	(0,173; 0,183; 0,202; 0,212)
C_{10}	(0,000; 0,004; 0,017; 0,030)	(0,230; 0,242; 0,268; 0,281)

Оптимальной альтернативой является A_1 ($CC_1 = 0,627$), демонстрирующая наименьшее расстояние до A^+ (0,160) и наибольшее до A^- (0,269). Следующими по эффективности идут A_3 ($CC_3 = 0,432$), A_2 ($CC_2 = 0,452$), A_5 ($CC_5 = 0,311$), A_4 ($CC_4 = 0,283$), A_7 ($CC_7 = 0,250$), A_{10} ($CC_{10} = 0,242$), A_8 ($CC_8 = 0,213$), A_6 ($CC_6 = 0,195$) и A_9 ($CC_9 = 0,120$), где A_9 имеет наибольшее расстояние до A^+ (0,335) и наименьшее до A^- (0,046). Растительные масла (A_1-A_5) превосходят животные жиры (A_6-A_8) по биоразлагаемости, но уступают минеральным по стабильности.

Таблица 3 — Расстояния альтернатив A_1-A_{10} до идеальных A^+ и A^- , коэффициенты относительной близости CC_i и ранги (по убыванию CC_i)
 Table 3 — Distances of alternatives A_1-A_{10} to ideal A^+ and A^- , relative proximity coefficients CC_i and ranks (descending CC_i)

A_i	d_i^+	d_i^-	CC_i	Ранг
A_1	0,160	0,269	0,627	1
A_2	0,245	0,202	0,452	2
A_3	0,245	0,187	0,432	3
A_4	0,299	0,118	0,283	5
A_5	0,283	0,128	0,311	4
A_6	0,311	0,075	0,195	9
A_7	0,304	0,101	0,250	6
A_8	0,313	0,085	0,213	8
A_9	0,335	0,046	0,120	10
A_{10}	0,324	0,103	0,242	7

Заключение. Метод Fuzzy TOPSIS успешно применен для многокритериального выбора базовых масел A_1 – A_{10} на основе ограниченных экспериментальных данных. Использование трапециевидных нечетких чисел позволило эффективно учесть вариабельность триботехнических и физико-химических свойств, таких как показатель износа (C_1), коэффициент трения (C_2), температура вспышки (C_3), температура застывания (C_4), плотность (C_5), кинетическая вязкость (C_6), кислотное число (C_7), содержание олеиновой (C_8), линолевой (C_9) и линоленовой (C_{10}) кислот, обеспечивая точное моделирование неопределенности. Метод энтропии Шеннона, использованный для определения весов критериев, выявил доминирующую роль электрофизических характеристик C_9 и C_{10} (веса 0,193 и 0,255 соответственно), что подчеркивает их значимость для окислительной стабильности масел, тогда как механические свойства C_1 – C_3 показали меньшую информативность из-за высокой энтропии.

Анализ расстояний до идеальных решений A^+ (FPIS) и A^- (FNIS) показал, что оптимальной альтернативой является рапсовое масло (A_1) с коэффициентом относительной близости $CC_1 = 0,627$, демонстрирующим наименьшее расстояние до A^+ (0,160) и наибольшее до A^- (0,269). Растительные масла (A_1 – A_5) превосходят животные жиры (A_6 – A_8) по биоразлагаемости, однако минеральное масло И-40 (A_9) и синтетическое ПАО 100 (A_{10}) показали меньшую эффективность ($CC_9 = 0,120$ и $CC_{10} = 0,242$), что подтверждает преимущество биоразлагаемых материалов.

Предложенный подход обеспечивает надежное ранжирование альтернатив на основе экспериментальных данных и может быть адаптирован для других задач и областей знаний.

Работа выполнена в рамках ГПНИ «8. Материаловедение, новые материалы и технологии» подпрограммы «8.4. Многофункциональные и композиционные материалы» задания № 4.2.3 НИР 2 и в рамках реализации проекта «Научно-образовательный математический центр “Северо-Западный центр математических исследований имени Софьи Ковалевской”» (соглашение № 075-02-2025-1607 от 27 февраля 2025 г.).

KAVALIOVA Inna N., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Leading Researcher of the Laboratory 2.1 “Mechanics of composites and biopolymers”¹

E-mail: innakov2@mail.ru

MARCHANKA Larysa N., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Head of Fundamental and Applied Mathematics Department²

Senior Researcher³

E-mail: lmarchenko@gsu.by

PODGORNAYA Viktoriya V., Ph. D. in Phys. and Math., Assoc. Prof.

Deputy Director for Science¹

E-mail: podgornaya@mpri.org.by

Список литературы

1. Состояние и перспективы развития производства биоразлагаемых пластичных смазок (обзор) / О.П. Паренаго, Р.З. Савиева, С.В. Антонов [и др.] // Нефтехимия. — 2017. — Т. 57, № 6. — С. 766–768.
2. Selection of engine oil using multi-attribute decision-making methods / A. Salunke, A. Lokhande, A. Neharkar [et al.] // International Journal of Industrial and Systems Engineering. — 2022. — Vol. 42, no. 1. — P. 96–117. — DOI: <https://doi.org/10.1504/IJISE.2022.126025>.
3. Marchenko, L.N. Selection of a base vegetable oil for the development of a biodegradable lubricant using the TOPSIS method / L.N. Marchenko, I.N. Kavaliyova, V.V. Podgornaya // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. — 2024. — Vol. 53, iss. 4. — P. 313–320. — DOI: <https://doi.org/10.1134/S1052618824700195>.
4. Friction reduction and antiwear mechanisms of cerium sulfide nanosheets under different sliding conditions / Z. Jiang, Z. Wang, C. Qiao [et al.] // Langmuir. — 2025. — Vol. 41, iss. 4. — P. 2492–2505. — DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.4c04231>.
5. Tribological properties and lubrication mechanism of oleylamine-modified FeCoNi magnetic nanoparticles as additive in polar synthetic ester oil / Z. Jiang, J. Wu, C. Qiao [et al.] // Wear. — 2025. — Vol. 566–567. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2025.205764>.
6. Смазочные композиции на основе рапсового масла / В.С. Поляков, Т.Е. Никифорова, В.А. Козлов, Ю.М. Базаров // Известия высших учебных заведений. Серия Химия и химическая технология. — 2008. — Т. 51, № 3. — С. 58–62.
7. Стрельцов, В.В. Перспективы использования в технике масел растительного происхождения / В.В. Стрельцов, А.М. Бугаев // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. — 2010. — № 2(41). — С. 47–49.
8. Hussain, M.M. Selection of vegetable oil based biolubricant using TOPSIS MCDM model / M.M. Hussain, V.R. Gaval, A.P. Pratap // Materials Today: Proceedings. — 2022. — Vol. 62, part 2. — P. 512–516. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.585>.
9. Hwang, C.-L. Methods for multiple attribute decision making / C.-L. Hwang, K. Yoon // Multiple attribute decision making: methods and applications a State-of-the-Art survey. — Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1981. — P. 58–191. — DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9_3. — (Lecture notes in economics and mathematical systems: LNE; vol. 186).
10. Chen, M.-F. Combining grey relation and TOPSIS concepts for selecting an expatriate host country / M.-F. Chen, G.-H. Tzeng // Mathematical and Computer Modelling. — 2004. — Vol. 40, iss. 13. — P. 1473–1490. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2005.01.006>.
11. Chen, S.-J. Fuzzy multiple attribute decision making methods / S.-J. Chen, C.-L. Hwang // Fuzzy multiple attribute decision making: methods and applications. — Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1992. — P. 289–486. — DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-46768-4_5. — (Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems: LNE; vol. 375).
12. Tukey, J.W. Exploratory data analysis / J.W. Tukey. — Reading: Addison-Wesley, 1977. — 712 p.
13. Zeleny, M. Multiple criteria decision making / M. Zeleny. — New York: McGraw-Hill, 1982. — 563 p.
14. Kaufmann, A. Introduction to fuzzy arithmetic: theory and applications / A. Kaufmann, M.M. Gupta. — New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1985. — 351 p.
15. Chen, C.-T. Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment / C.-T. Chen // Fuzzy Sets and Systems. — 2000. — Vol. 114, iss. 1. — P. 1–9. — DOI: [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(97\)00377-1](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(97)00377-1).

ZIYAMUKHAMEDOVA Umida A., D. Sc. in Eng., Prof.

Professor of the Department of Materials Science and Mechanical Engineering⁴

E-mail: umida1973@yandex.ru

¹V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of the NAS of Belarus, Gomel, Republic of Belarus

²Francisk Skorina Gomel State University, Gomel, Republic of Belarus

³Sofia Kovalevskaya Northwestern Center for Mathematical Research, Pskov, Russian Federation

⁴Tashkent State Transport University, Tashkent, Republic of Uzbekistan

Received September 29, 2025.

MULTI-CRITERIA CHOICE OF BASE OILS IN THE PRODUCTION OF LUBRICANTS BASED ON FUZZY TOPSIS

The friction units in any mechanism play an important role for their effective work as a whole. Modern mechanisms are not only high-precision, but also multi-component systems in which the selection of lubricant is an important task for developers and manufacturers. Developers need to take into account the properties of the friction unit materials and its functionality, loads, and manufacturers to get a final product not only reliable, but also cost-effective, meeting consumer demands. Since lubricants have different composition and functional purpose, a system approach should be used in their selection. The presented paper proposes a methodology of selection of base oil based on their physico-chemical properties (criteria) according to the results of physical experiment and unclear approach. The experimental data were converted into trapezoidal fuzzy numbers, unclear weights of selection criteria were determined, and a Fuzzy TOPSIS procedure was carried out. The proposed approach takes into account the variation of experimental data and measurement uncertainty when grading base oils by their physico-chemical properties.

Keywords: vegetable oils, animal fats, biodegradable lubricants, friction coefficient, wear rate, entropy, Fuzzy TOPSIS, rating, environmental pollution

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2026-1-74-81-87>

References

1. Parenago O.P., et al. Sostoyanie i perspektivy razvitiya proizvodstva biorazlagaemykh plastichnykh smazok (obzor) [State and prospects of the production of biodegradable plastic lubricants (review)]. *Neftekhimiya*, 2017, vol. 57, no. 6, pp. 766–768 (in Russ.).
2. Salunke A., et al. Selection of engine oil using multi-attribute decision-making methods. *International journal of industrial and systems engineering*, 2022, vol. 42, no. 1, pp. 96–117. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJISE.2022.126025>.
3. Marchenko L.N., Kavaliyova I.N., Podgornaya V.V. Selection of a base vegetable oil for the development of a biodegradable lubricant using the TOPSIS method. *Journal of machinery manufacture and reliability*, 2024, vol. 53, iss. 4, pp. 313–320. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1052618824700195>.
4. Jiang Z., et al. Friction reduction and antiwear mechanisms of cerium sulfide nanosheets under different sliding conditions. *Langmuir*, 2025, vol. 41, iss. 4, pp. 2492–2505. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.4c04231>.
5. Jiang Z., et al. Tribological properties and lubrication mechanism of oleylamine-modified FeCoNi magnetic nanoparticles as additive in polar synthetic ester oil. *Wear*, 2025, vol. 566–567. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2025.205764>.
6. Polyakov V.S., Nikiforova T.E., Kozlov V.A., Bazarov Yu.M. Smazochnye kompozitsii na osnove rapsovogogo masla [Lubricating compositions on the base of colza oil]. *ChemChemTech*, 2008, vol. 51, no. 3, pp. 58–62 (in Russ.).
7. Streltsov V.V., Bugayev A.M. Perspektivy ispolzovaniya v tekhnike masel rastitel'nogo proiskhozhdeniya [Use prospects in technique of oils of a phytogenesis]. *Vestnik FGOU VPO "Moscow State Agroengineering University Named after V.P. Goryachkin"*, 2010, no. 2(41), pp. 47–49 (in Russ.).
8. Hussain M.M., Gaval V.R., Pratap A.P. Selection of vegetable oil based biolubricant using TOPSIS MCDM model. *Materials today: proceedings*, 2022, vol. 62, part 2, pp. 512–516. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.585>.
9. Hwang C.L., Yoon K. Methods for multiple attribute decision making. *Multiple attribute decision making: Methods and applications a State-of-the-Art survey*, 1981, pp. 58–191. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9_3.
10. Chen M.-F., Tzeng G.-H. Combining grey relation and TOPSIS concepts for selecting an expatriate host country. *Mathematical and computer modelling*, 2004, vol. 40, iss. 13, pp. 1473–1490. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2005.01.006>.
11. Chen S.-J., Hwang C.-L. Fuzzy multiple attribute decision making methods. *Fuzzy multiple attribute decision making: Methods and applications*, 1992, pp. 289–486. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-46768-4_5.
12. Tukey J.W. *Exploratory data analysis*. Reading, Addison-Wesley, 1977. 712 p.
13. Zeleny M. *Multiple criteria decision making*. New York, McGraw-Hill, 1982. 563 p.
14. Kaufmann A., Gupta M.M. *Introduction to fuzzy arithmetic: Theory and applications*. New York, Van Nostrand Reinhold Company, 1985. 351 p.
15. Chen C.-T. Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. *Fuzzy sets and systems*, 2000, vol. 114, iss. 1, pp. 1–9. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(97\)00377-1](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(97)00377-1).