

---

---

## НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

---

---

УДК 303.722.4:621.892

### ВЫБОР БАЗОВОГО РАСТИТЕЛЬНОГО МАСЛА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ БИОРАЗЛАГАЕМОГО СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА TOPSIS

© 2024 г. Л. Н. Марченко<sup>1, 2</sup>, И. Н. Ковалева<sup>3, \*</sup>, В. В. Подгорная<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Гомельской государственной университет им. Ф. Скорины, Гомель, Беларусь

<sup>2</sup>Научно-образовательный математический центр “Северо-Западный центр математических исследований им. С. Ковалевской” Псковского государственного университета, Псков, Россия

<sup>3</sup>Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь

\*e-mail: innakov2@mail.ru

Поступила в редакцию 10.12.2023 г.

После доработки 02.04.2024 г.

Принята к публикации 19.04.2024 г.

Рассмотрены растительные масла и животные жиры как базовые основы для разработки биоразлагаемых смазочных материалов. Проведена классификация таких материалов с помощью метода Уорда на основе расстояния Евклида с последующим уточнением методом  $k$ -средних по физико-химическим свойствам. Выбор материала, обладающего оптимальными характеристиками, осуществлялся с помощью метода TOPSIS. На основе рассчитанных коэффициентов относительной близости к “идеальному” материалу построен рейтинг смазочных материалов, среди которых наибольший интерес представляет рапсовое масло. Приведены сравнительные триботехнические характеристики растительных масел, имеющих наилучший рейтинг. Показано, что растительные масла не уступают минеральному и синтетическому. Результаты ранжирования могут использоваться в дальнейших фундаментальных и прикладных исследованиях по разработке биоразлагаемых смазочных материалов.

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

DOI: 10.31857/S0235711924040038, EDN: OZKQVR

Проблемы загрязнения окружающей среды во всем мире обуславливают интерес исследователей и промышленных предприятий к смазочным материалам на основе растительных масел и животных жиров. Возрастающие требования к экологической безопасности в ряде отраслей промышленности, сельского и лесного хозяйства привели к использованию биоразлагаемых смазочных материалов на базовой основе из растительных масел [1, 2]. В тоже время, в условиях экономических санкций проблема импортозамещения приобрела особую актуальность и является определяющим фактором для развития отечественной экономики. В этой связи особо остро стоит вопрос поиска базовых компонентов для производства смазочных материалов

внутри страны, обеспеченных отечественным сырьем, технологиями и производственными мощностями [3]. Это позволит решить не только проблему расширения номенклатурного ряда смазочных материалов на отечественном рынке, но и проблему импортозамещения [4–6].

Основной проблемой отбора образцов для базовой основы является неравнозначность признаков, по которым он производится [5, 6], что обусловлено различной значимостью характеристик с точки зрения описания функциональности объекта. Решение проблемы возможно с помощью многокритериальных методов принятия решений [7–9]. В настоящем исследовании для выбора смазочного материала на основе физико-химических характеристик использовался метод TOPSIS (The Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution). Идея метода TOPSIS [8, 9] заключается в том, что из сравниваемых альтернатив (смазочных материалов) наилучшей считается та, которая имеет наименьшее расстояние от наилучшего варианта (“идеального” решения) и наибольшее расстояние от наихудшего (“антиидеального” решения). Актуальность применяемого метода состоит в том, что в результате оценки появляется возможность ранжировать смазочные материалы по физико-химическим свойствам с оптимальными характеристиками, что можно использовать как в прикладных исследованиях различной тематической направленности, так и фундаментальных.

**Цель статьи** – классификация и формирование объективного ранжирования растительных масел и животных жиров по физико-химическим свойствам для последующего выбора наиболее подходящих для разработки биоразлагаемых смазочных материалов.

**Материалы и методы исследований.** В качестве объектов исследования рассматривались следующие смазочные материалы: растительные масла, животные жиры, а также минеральное И-40 и синтетическое ПАО 100 масла без присадок для сравнения свойств с растительными объектами. Выбор масел и жиров обусловлен их экономической эффективностью и географической принадлежностью к Евразийскому и Азиатскому регионам. Рассматриваемые смазочные материалы и их физико-химические свойства представлены в табл. 1. Числовые данные, приведенные в табл. 1, приняты как среднестатистические значения, полученные из литературных источников [4–6, 10–14].

Выявление групп смазочных материалов со схожими физико-химическими свойствами проводилось в два этапа: предварительная идентификация кластеров материалов с помощью иерархического алгоритма Уорда и визуализацией в виде дендрограммы с последующим уточнением кластеров с помощью итерационной процедуры разбиения методом  $k$ -средних.

Пусть  $X = [x_{ij}]$  матрица характеристик смазочных материалов (объектов)  $X_1, \dots, X_m$  по физико-химическим свойствам  $K_1, \dots, K_K$ ;  $i = 1, \dots, m$ ;  $j = 1, \dots, K$ . Каждый  $i$ -й смазочный материал представлен точкой в  $K$ -мерном пространстве с координатами  $X_i = (x_{i1}, \dots, x_{iK})$ . Согласно методу Уорда при расчете расстояний между кластерами используется прирост суммы квадратов расстояний объектов до центров, полученных в результате объединения кластеров, т.е. оптимизируется минимальная дисперсия внутрикластерных расстояний [7–9]. В качестве расстояния между объектами  $X_l$  и  $X_k$  используется расстояние Евклида

$$d_{lk} = \sqrt{\sum_{j=1}^K (x_{lj} - x_{kj})^2}, \quad l, k = 1, \dots, m.$$

Ранжирование смазочных материалов по физико-химическим свойствам осуществлялось с помощью метода TOPSIS, состоящего из следующих шагов. По

Таблица 1. Физико-химические свойства объектов исследования

Масло	Свойства				
	Плотность при 20°C, кг/м <sup>3</sup>	Кинематическая вязкость при 100°C, мм <sup>2</sup> /с	Кислотное число, мг КОН/г	Температура вспышки, °С	Температура застывания, °С
	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$
Рапсовое, $X_1$	906.1	8.09	6.40	224	-9
Подсолнечное, $X_2$	927.5	7.93	2.44	320	-16
Кукурузное, $X_3$	915.0	8.50	0.35	234	-12
Льняное, $X_4$	930.0	6.33	0.70	280	-21
Оливковое, $X_5$	911.3	8.43	5.90	285	-12
Соевое, $X_6$	923.7	7.67	0.03	318	-12
Пальмовое, $X_7$	917.6	8.62	0.17	315	30
Касторовое, $X_8$	1068.7	19.88	1.18	296	-27
Кокосовое, $X_9$	925.0	8.25	0.50	232	19
Конопляное, $X_{10}$	928.0	7.30	0.40	225	-25
Свиной жир, $X_{11}$	916.0	7.43	1.50	210	35
Говяжий жир, $X_{12}$	870.0	7.38	1.80	225	38
Куриный жир, $X_{13}$	820.0	7.11	1.30	160	25
Минеральное И-40, $X_{14}$	890.0	8.50	0.05	200	-15
ПАО 100, $X_{15}$	845.0	9,80	0,05	290	-30

исходной матрице  $X = [x_{ij}]$  находятся элементы нормализованной матрицы  $Y = [y_{ij}]$  по формуле

$$y_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}, \quad i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, K.$$

Веса  $w_j$  свойств  $K_j, j = 1, \dots, K$ , определяются с помощью энтропийного подхода [15]. Энтропия  $j$ -го свойства  $K_j$  есть

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m z_{ij} \ln z_{ij},$$

где  $z_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}.$

При этом, если  $z_{ij} = 0$ , то считается, что  $z_{ij} \ln z_{ij} = 0$ .

Если все свойства информативны, то веса показателей равны

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{i=1}^m d_j},$$

где  $d_j = 1 - e_j, j = 1, \dots, K$ .

Тогда элементы взвешенной нормализованной матрицы  $V = [v_{ij}]$  определяются по формуле  $v_{ij} = y_{ij} \cdot w_j$ ,  $i = 1, \dots, m$ ;  $j = 1, \dots, K$ .

Идеальное позитивное решение  $A^+$  и наихудшее решение  $A^-$  представляют собой максимальное и минимальное значения в столбцах матрицы  $V$

$$A^+ = \left( \max_{1 \leq i \leq m} v_1, \dots, \max_{1 \leq i \leq m} v_K \right) = (v_1^+, \dots, v_K^+),$$

$$A^- = \left( \min_{1 \leq i \leq m} v_1, \dots, \min_{1 \leq i \leq m} v_K \right) = (v_1^-, \dots, v_K^-).$$

Далее для каждого смазочного материала  $X_i$  рассчитываются расстояния  $s_i^+$  и  $s_i^-$ , характеризующие близость к идеальному наилучшему  $A^+$  и наихудшему  $A^-$  решениям соответственно:

$$s_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^K (v_j^+ - v_{ij})^2}, \quad s_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^K (v_j^- - v_{ij})^2}, \quad i = 1, \dots, m.$$

Коэффициент относительной близости  $X_i$  к идеальному решению  $A^+$  определяется по формуле

$$C_i = \frac{s_i^-}{s_i^+ + s_i^-}.$$

Коэффициент  $C_i$ ,  $0 \leq C_i \leq 1$ , характеризует оценку  $i$ -го смазочного материала согласно рассматриваемых свойств  $K_1-K_K$ . Чем выше значение  $C_i$ , тем более высокий рейтинг имеет смазочный материал  $X_i$ ,  $i = 1, \dots, m$ .

Измерение показателя износа  $D_n$  объектов исследования проводили по ГОСТ 32502–2013 на ЧШМ-К1 (Технопромкомплект, Украина). Начальная нагрузка составляла  $N = 40.0 \pm 1.0$  кгс, время проведения испытаний  $t = 60 \pm 1$  мин, скорость вращения вала  $W = 1460.0 \pm 70.0$  мин<sup>-1</sup>, диаметр шариков  $D = 2.7 \pm 0.1$  мм, материал шариков ШХ15. Коэффициент трения  $f$  при малых нагрузках исследовали на микротрибометре МТУ 2К7 [16] по схеме возвратно-поступательного движения шара по плоскости. Начальная нагрузка составляла  $N = 1.00 \pm 0.01$  Н, скорость движения –  $5.00 \pm 0.01$  мм/с, длина одного прохода – 5 мм, диаметр шарика –  $D = 4.60 \pm 0.01$  мм, материал индентора-шарика и плоской подложки ШХ15. Исследуемое жидкое масло наносилось на очищенную плоскую подложку в объеме 10 мкл и оставлялось на 120 мин для самопроизвольного растекания по поверхности. Твердые жиры наносились без контроля объема намазыванием одноразовым деревянным медицинским шпателем, а излишки удалялись безворсовой салфеткой. На индентор масло не наносилось. Количество повторений каждого испытания составляло 5 с доверительным интервалом 95%.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Кластеризация рассматриваемых смазочных материалов  $X_1-X_{15}$  (табл. 1) по физико-химическим свойствам  $K_1-K_5$  с помощью метода Уорда на основе расстояния Евклида дала шесть кластеров (рис. 1). Далее проведена уточненная классификация методом  $k$ -средних, в результате которой получаем эти же группы материалов. Смазочные материалы касторовое масло  $X_8$ , куринный жир  $X_{13}$  и ПАО 100  $X_{15}$  образовали три одиночных кластера: С3, С5, С6. Оставшиеся смазочные материалы образовали следующие кластеры: кластер С1 – рапсовое  $X_1$ , кукурузное  $X_3$ , конопляное  $X_{10}$ , минеральное И-40  $X_{14}$ ; кластер С2 – льняное  $X_4$ , оливковое  $X_5$ , соевое  $X_6$ , пальмовое  $X_7$ , подсолнечное  $X_2$ ; кластер С4 – свиной жир  $X_{11}$ , говяжий жир  $X_{12}$ , кокосовое  $X_9$ .

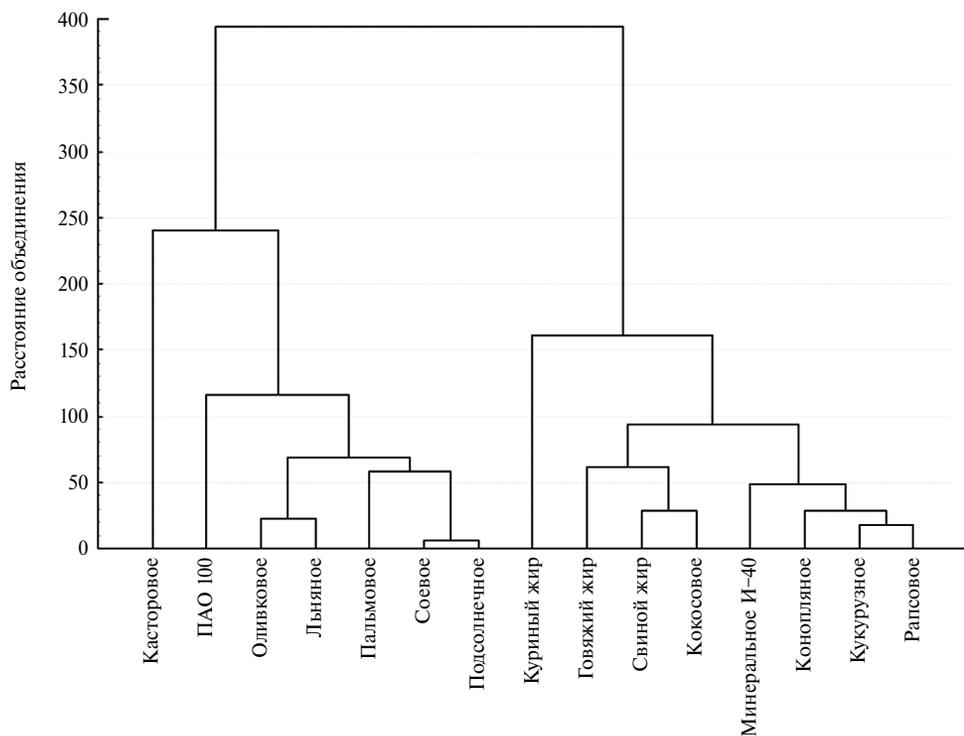


Рис. 1. Дендрограмма смазочных материалов.

Средние значения физико-химических свойств  $K_1$ – $K_5$  в кластерах представлены на рис. 2.

Наибольшее различие средних значений физико-химических свойств в кластерах наблюдается по  $K_1$  (плотность при 20°C) и  $K_4$  (температура вспышки). При этом эти свойства являются одними из ключевых для смазочных материалов, поскольку плотность определяет смазочную способность и образование защитной пленки на поверхностях трения, а температура вспышки – минимальную температуру воспламенения паров масла при нагревании. Поэтому при разработке смазочных материалов для заданных условий работы узла трения следует в большей степени ориентироваться именно на эти параметры [17].

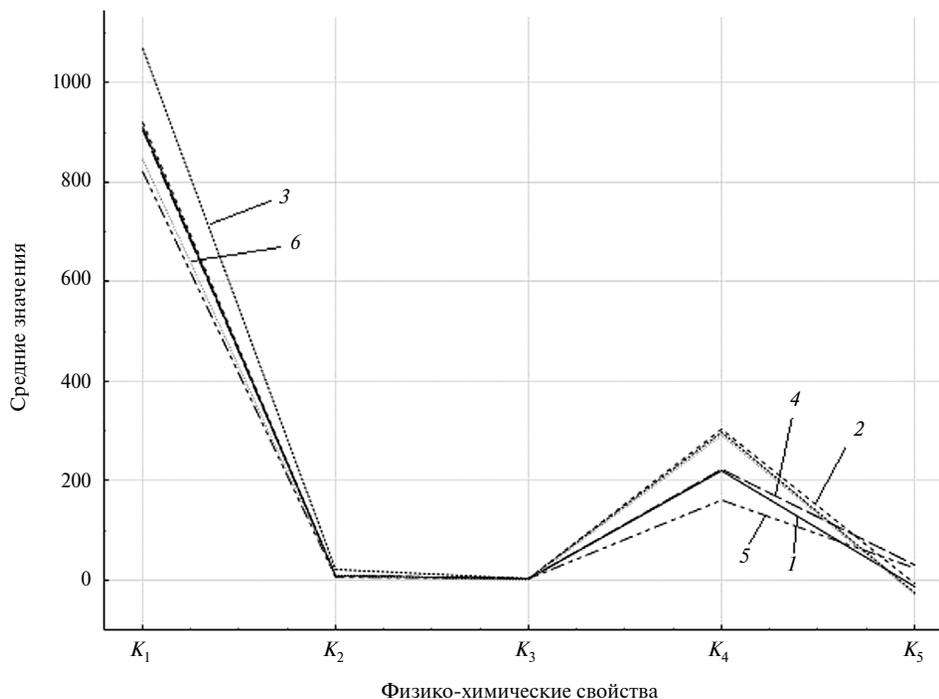
Далее определим смазочный материал, который обладает оптимальными характеристиками с помощью метода TOPSIS. Значения  $y_{ij}$  нормализованной матрицы  $Y$  представлены в табл. 2.

Энтропии и веса показателей приведены в табл. 3.

Наиболее отличающиеся по физико-химическими свойствам, согласно табл. 3, оказываются температура застывания  $K_5$  ( $w_5 = 0.511$ ) и кислотное число  $K_3$  ( $w_3 = 0.445$ ), наименее – плотность  $K_1$  ( $w_1 = 0.001$ ) и температура вспышки  $K_4$  ( $w_4 = 0.012$ ), что согласуется с проведенной выше классификаций смазочных материалов.

Ранжирование рассматриваемых смазочных материалов согласно методологии TOPSIS основано на относительной близости к “идеальному” материалу с наилучшими физико-химическими свойствами (табл. 4).

Согласно данным, представленным в табл. 4, наилучшее приближение к “идеальной” базовой основе для смазочного материала по указанным физико-химическим



**Рис. 2.** Средние значения физико-химических свойств в кластерах: 1 – кластер С1: рапсовое, кукурузное, конопляное, минеральное И-40; 2 – кластер С2: подсолнечное, льняное, оливковое, соевое, пальмовое; 3 – кластер С3: касторовое; 4 – кластер С4: кокосовое, свиной жир, говяжий жир; 5 – кластер С5: куриный жир; 6 – кластер С6: ПАО 100.

**Таблица 2.** Нормализованная матрица  $Y = [y_{ij}]$

	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$
Рапсовое, $X_1$	0.26	0.23	0.67	0.22	-0.03
Подсолнечное, $X_2$	0.26	0.22	0.26	0.32	-0.18
Кукурузное, $X_3$	0.26	0.24	0.04	0.23	-0.13
Льняное, $X_4$	0.26	0.18	0.07	0.28	-0.23
Оливковое, $X_5$	0.26	0.23	0.62	0.28	-0.13
Соевое, $X_6$	0.26	0.21	0.00	0.32	-0.13
Пальмовое, $X_7$	0.26	0.24	0.02	0.31	0.33
Касторовое, $X_8$	0.30	0.55	0.12	0.30	-0.30
Кокосовое, $X_9$	0.26	0.23	0.05	0.23	0.21
Конопляное, $X_{10}$	0.26	0.20	0.04	0.22	-0.28
Свиной жир, $X_{11}$	0.26	0.21	0.16	0.21	0.39
Говяжий жир, $X_{12}$	0.25	0.21	0.19	0.22	0.42
Куриный жир, $X_{13}$	0.23	0.20	0.14	0.16	0.28
Минеральное И-40, $X_{14}$	0.25	0.24	0.01	0.20	-0.17
ПАО 100, $X_{15}$	0.24	0.27	0.01	0.29	-0.33

Таблица 3. Энтропии и веса показателей  $K_1-K_5$ 

Показатель	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$
$e_j$	0.999	0.982	0.754	0.993	0.717
$w_j$	0.001	0.032	0.445	0.012	0.511

Таблица 4. Ранжирование смазочных материалов

Смазочный материал	Ранг
Рапсовое масло, $X_1$	3
Подсолнечное масло, $X_2$	6
Кукурузное масло, $X_3$	9
Льняное масло, $X_4$	12
Оливковое масло, $X_5$	5
Соевое масло, $X_6$	10
Пальмовое масло, $X_7$	4
Касторовое масло, $X_8$	13
Кокосовое масло, $X_9$	7
Конопляное масло, $X_{10}$	14
Свиной жир, $X_{11}$	2
Говяжий жир, $X_{12}$	1
Куриный жир, $X_{13}$	8
Минеральное И-40, $X_{14}$	15
ПАО 100, $X_{15}$	11

свойствам из растительных масел показали рапсовое масло  $X_1$ , пальмовое  $X_7$ , оливковое  $X_5$  и подсолнечное  $X_2$ , ранги которых равны 3, 4, 5 и 6 соответственно; из животных жиров – говяжий  $X_{12}$  и свиной жиры  $X_{11}$ , ранги которых 1 и 2 соответственно. Таким образом, проведенное исследование позволило выделить две группы масел: жидкие масла – рапсовое, оливковое, подсолнечное; твердые масла и жиры – говяжий жир, свиной жир и пальмовое масло. Синтетическое и минеральное масло по данной методике показали не очень высокий рейтинг.

По результатам ранжирования проведены триботехнические исследования коэффициента трения  $f$  и показателя износа  $D_{и}$  масел с лучшим рейтингом (табл. 5).

Данные в табл. 5 показывают согласованность результатов ранжирования для растительных масел по физико-химическим свойствам с триботехническими характеристиками: в обоих случаях из растительных масел рапсовое масло  $X_1$  дает наилучшее приближение к “идеальному” смазочному материалу. Минеральное масло И-40  $X_{14}$  и ПАО 100  $X_{15}$  по триботехническим характеристикам не соответствуют рейтингу по методу TOPSIS и имеют лучшие характеристики, чем растительные масла. Это связано с их строением и свойствами, неучтенными в рассмотренной методике [18].

**Выводы.** Анализ физико-химических свойств растительных масел и животных жиров показал, что растительные масла и животные жиры обладают физико-химическими свойствами не хуже минерального и синтетического масел. Однако многообразие признаков и объектов исследований создают трудности при выборе наиболее оптимальных масел для разработки смазочных материалов на их основе. Методами

**Таблица 5.** Триботехнические характеристики объектов исследования

Объект исследования	Ранг	$f$	$D_{и}$ , мм
Рапсовое масло, $X_1$	3	$0.21 \pm 0.01$	$0.67 \pm 0.01$
Подсолнечное масло, $X_2$	6	$0.25 \pm 0.02$	$0.68 \pm 0.01$
Оливковое масло, $X_3$	5	$0.22 \pm 0.02$	$0.68 \pm 0.04$
Пальмовое масло, $X_7$	4	$0.21 \pm 0.01$	$0.51 \pm 0.03$
Свиной жир, $X_{11}$	2	$0.19 \pm 0.01$	$0.48 \pm 0.04$
Говяжий жир, $X_{12}$	1	$0.18 \pm 0.01$	$0.41 \pm 0.01$
Минеральное И-40, $X_{14}$	15	$0.17 \pm 0.02$	$0.65 \pm 0.01$
ПАО 100, $X_{15}$	11	$0.16 \pm 0.03$	$0.57 \pm 0.02$

кластерного анализа проведена классификация масел по пяти физико-химическим свойствам.

Показано, что при выборе оптимального смазочного материала с помощью метода TOPSIS наиболее энтропийными свойствами являются плотность материала и температура вспышки. Определены коэффициенты, характеризующие наилучшее приближение к “идеальному” смазочному материалу по рассматриваемым свойствам, что позволило ранжировать смазочные материалы.

По результатам кластеризации и ранжирования были выделены две группы смазочных материалов: жидкие масла – рапсовое, оливковое, подсолнечное; твердые жиры и масла – говяжий жир, свиной жир и пальмовое масло. Составляющие этих групп обладают схожими физико-химическими свойствами, с одной стороны, и близки к “идеальному” смазочному материалу, с другой.

Результаты триботехнических испытаний свидетельствуют о соответствии ранжирования растительных масел и животных жиров по физико-химическим свойствам их триботехническим характеристикам – коэффициенту трения и показателю износа. Таким образом, можно говорить о том, что для разработки биоразлагаемого смазочного материала в качестве базовой основы целесообразно использовать рапсовое масло.

Предложенные методы можно использовать для выбора оптимальных объектов по заданным свойствам, при наличии большого количества неравнозначных и некоррелирующих между собой признаков, и количества самих объектов, в различных отраслях исследований прикладного и фундаментального значения.

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках ГПНИ “8. Материаловедение, новые материалы и технологии” подпрограммы “8.4. Многофункциональные и композиционные материалы” задания № 4.2.3 НИР 1 и ГБ 23-02 “Вероятностные и алгебраические модели сложных структур”.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Directive 2003/30/EC8.05/2005; Directive 2009/28/EC23.07.2009.
2. Holmberg K., Erdemir A. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions // Friction. 2017. № 5. P. 263.  
<https://doi.org/10.1007/s40544-017-0183-5>  
<https://president.gov.by/ru/documents/ukaz-no-156-ot-7-maya-2020-g>
3. Поляков В. С., Никифорова Т. Е., Козлов В. А., Базаров Ю. М. Смазочные композиции на основе рапсового масла // Химия и химическая технология. 2008. Т. 51. № 3. С. 58.

4. Григорьев Ф. А., Подгорная В. В., Марченко Л. Н., Ковалева И. Н. Оптимизация концентрации антиокислительной присадки в пластичном смазочном материале на основе рапсового масла // ММММ. 2023. Т. 64. № 3. С. 66.  
<https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-3-64-66-72>
5. Стрельцов В. В., Бугаев А. М. Перспективы использования в технике масел растительного происхождения // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. 2010. № 32. С. 47.
6. Зак Ю. А. Прикладные задачи многокритериальной оптимизации. М.: Экономика, 2014. 455 с.
7. Черноруцкий И. Г. Методы оптимизации и принятия решений. СПб.: Лань, 2001. 384 с.
8. Hwang C. L., Yoon K. Multiple attributes decision making methods and applications. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1981. 269 p.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>  
<https://fitaudit.ru/categories/oil/linolenic>
9. Гуреев А. А., Фукс И. Г., Лаихи В. Л. Химмотология. М.: Химия, 1986. 368 с.
10. Игнатовец О. С., Лазарева О. Г., Леонтьев В. Н. Идентификация животного жира по жирнокислотному составу // Труды БГУ. Физиологические, биохимические и молекулярные основы функционирования биосистем. 2006. Вып. 1. С. 257.
11. Григорьев А. Я., Ковалева И. Н., Крейвайтис Р., Купчинскас А., Падгурскас Ю. Влияние жирнокислотного состава и структуры алкильных радикалов триглицеридов растительных масел на их триботехнические характеристики // Трение и износ. 2016. Т. 37. № 6. С. 755.
12. Myshkin N. K., Grigoriev A. Ya., Kavaliova I. N. Influence of Composition of Plant Oils on Their Tribological Properties // Tribology in Industry. 2017. V. 39. № 2. P. 207.  
<https://doi.org/10.24874/ti.2017.39.02.07>
13. Kasprzak D. A doubly extended TOPSIS method for group decision making based on ordered fuzzy numbers // Expert Systems with Applications. 2018. V. 116. P. 243.  
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.09.023>
14. Григорьев А. Я., Гуцев Д. М., Зозуля А. П., Ковалева И. Н., Кудрицкий В. Г., Мышкин Н. К., Семенов М. С. Возвратно-поступательный миллитрибومتر МТУ-2К7 // Трение и износ. 2014. Т. 35. № 6. С. 664.
15. Чичинадзе А. В., Браун Э. Д., Буше Н. А. и др. Учебник для технических вузов. 2-е изд. перер., и доп. / Под общ. ред. А. В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2001. 664 с.
16. Ковалева И. Н., Колесников И. В., Сычев А. П., Подгорная В. В., Иванова И. В., Шубитидзе В. В. Методы отбора базового сырья для разработки биоразлагаемых смазочных материалов // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. 2023. Т. 62. № 4. С. 28.