

УДК 539.621

Ф.А. ГРИГОРЬЕВ

младший научный сотрудник отдела «Трение, смазка и эксплуатационная стойкость материалов»¹
E-mail: grigoriev.feodor@gmail.com

В.В. ПОДГОРНАЯ, канд. физ.-мат. наук, доц.
заместитель директора по научной работе¹
E-mail: podgornaya@mpri.org.by

Л.Н. МАРЧЕНКО, канд. техн. наук, доц.
заведующий кафедрой фундаментальной и прикладной математики²
E-mail: lmarchenko@gsu.by

И.Н. КОВАЛЁВА, канд. техн. наук, доц.
ведущий научный сотрудник отдела «Трение, смазка и эксплуатационная стойкость материалов»¹
E-mail: innakov@tut.by

¹Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси, г. Гомель, Республика Беларусь

²Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины, г. Гомель, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 16.06.2023.

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ АНТИОКИСЛИТЕЛЬНОЙ ПРИСАДКИ В ПЛАСТИЧНОМ СМАЗОЧНОМ МАТЕРИАЛЕ НА ОСНОВЕ РАПСОВОГО МАСЛА

Рассмотрен пластичный смазочный материал с дисперсионной средой из рапсового масла с добавлением антиокислительной присадки дифениламин. Проведен анализ триботехнических, химических и физико-механических характеристик полученных смазочных материалов с содержанием антиокислительной присадки от 0,5 до 10,0 масс.%. Показано влияние концентрации и температуры введения присадки на функциональные характеристики смазочных материалов. Предложена комплексная методика оценки оптимальной концентрации и температуры введения антиокислительной присадки с использованием интегрального показателя по совокупности функциональных характеристик смазки. Отмечено, что для пластичного смазочного материала с дисперсионной средой из рапсового масла и дисперсной фазой на основе комплексного кальциевого загустителя оптимальным температурным диапазоном введения антиокислительной присадки является 85–95 °С на этапе охлаждения, при концентрации 1,0 масс.%. При этом достигается наилучшее сочетание функциональных характеристик готового продукта. На основании предложенной методики и с учетом экспериментальных данных при использовании экспертных критериев представляется возможным оптимизация концентрации и температуры введения антиокислительной присадки дифениламин для получения пластичного смазочного материала с заданными характеристиками.

Ключевые слова: пластичный смазочный материал, кальциевый комплексный загуститель, рапсовое масло, трение, трибопленка, окисление, интегральный показатель, моделирование, экологическая безопасность

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-3-64-66-72>

Введение. Пластичные смазочные материалы (ПСМ) состоят из жидкой основы (дисперсионная среда) и загустителя (дисперсная фаза). В качестве дисперсной фазы наиболее часто используют мыльные загустители, реже — углеводородные и немыльные, к которым относятся продукты перегонки нефти, различные глины и полимеры [1, 2]. Жидкая основа традиционных консистентных смазок в большинстве случаев

представлена минеральными, реже — синтетическими маслами [3–5].

Возрастающие требования к экологической безопасности в целом ряде отраслей промышленности [6, 7] и сельского хозяйства [8] вызвали интерес к применению биоразлагаемых растительных масел в качестве основы индустриальных смазок, а также дисперсионной среды консистентных [9, 10]. Однако, несмотря на сравнимые с мине-

ральными маслами триботехнические и физико-механические характеристики масел из растительного сырья [10–14], широкому распространению этого подхода препятствует их низкая окислительная устойчивость [15]. Нагрев как в технологическом процессе, так и при эксплуатации существенно ухудшает функциональные свойства растительных масел [12]. Одним из путей решения этой проблемы является использование антиокислительных присадок [13–16]. Однако здесь имеются два ограничивающих фактора.

Как было показано в работе [12], противозносные свойства растительных масел в значительной мере обусловлены процессами их окисления в зоне трения и образования защитных пленок на контактирующих поверхностях. Другим влияющим фактором является то, что антиоксиданты срабатываются в технологических процессах изготовления смазки при интенсивном окислении растительных масел в условиях повышенных температур. Таким образом, концентрация антиокислительной присадки в составе смазки на основе растительного сырья должна быть достаточной, чтобы замедлить процессы ее окисления в ходе эксплуатации, но не настолько большой, чтобы ингибировать процессы образования трибопленок.

Цель исследований — определение оптимальной температуры введения и концентрации антиокислительной присадки в составе консистентного смазочного материала на основе рапсового масла.

Материалы и методы исследования. В качестве объектов исследования использован пластичный смазочный материал на основе комплексного кальциевого загустителя и технического рапсового масла (ГОСТ 31759-2012). Смазочные композиции изготавливались по известному технологическому процессу с содержанием 15 % кальциевого загустителя [15]. В качестве антиокислительной присадки был выбран дифениламин (ДФА) (ГОСТ 194-80).

Для экспериментов изготовлены две серии образцов по семь композиций в каждой. Во всех сериях концентрация ингибитора варьировалась от 0 до 10,0 масс.%, однако в первой серии он вво-

дился в дисперсионную среду до начала технологического процесса, а во второй — при охлаждении готовой композиции.

Для анализа триботехнических характеристик использовалась четырехшариковая машина трения ЧШМ-К1 по ГОСТ 9490-75. Содержание свободных кислот в полученных пластичных смазках определяли методом титрования по ГОСТ 6707-76, предел прочности на сдвиг определяли с использованием прибора ЛИНТЕЛ СК-20 по ГОСТ 7143-73. Коллоидная стабильность оценивалась с использованием ЛИНТЕЛ АКС-20 по ГОСТ 7142-74. Определение температуры каплепадения осуществлялось с использованием термометра Уббелоды по ГОСТ 6793-74.

Результаты и их обсуждение. На первом этапе рассмотрено влияние нагрева смазки при различных концентрациях ДФА в стандартном технологическом процессе на основные функциональные характеристики смазочного материала (таблица 1).

Как можно видеть, введение ДФА существенно не изменяет показатель износа, помимо этого, при увеличении концентрации, наблюдается снижение содержания свободных кислот. Уменьшение предела прочности на сдвиг и коллоидной стабильности смазочных композиций свидетельствует о негативном влиянии антиокислителя на основные характеристики получаемого смазочного материала.

Для оценки влияния концентрации ДФА на характеристики смазочного материала и определение оптимальных характеристик использовался статистический анализ данных эксперимента и многокритериальный анализ полученных результатов. С этой целью были выбраны целевые параметры качества смазки и их значения, основываясь на данных справочной литературы и экспертной оценки функционального назначения смазочного материала (таблица 2) [17].

Статистическая оценка взаимосвязи физико-механических и триботехнических свойств пластичного смазочного материала с концентрацией антиокислительной присадки проводилась на уровне

Таблица 1 — Характеристики кальциевой смазки на основе рапсового масла с антиокислительной присадкой, введенной в состав до технологического нагрева

Table 1 — Characteristics of calcium lubricant based on rapeseed oil with antioxidant additive introduced into the composition before process heating

Параметры комплексной кальциевой смазки с дисперсионной средой из рапсового масла	Содержание ДФА, масс.%						
	0*	0,1	0,5	1,0	3,0	5,0	10,0
Содержание свободных кислот, мгКОН/г	4,648	3,561	2,5	2,323	1,575	1,471	1,385
Предел прочности на сдвиг при 50 °С, Па	118	116	98	88	63	63	61
Коллоидная стабильность, %	21	15	12	20	12	12	10
Температура каплепадения, °С	237	210	203	208	210	221	213
Показатель износа, мм	0,87	0,86	0,9	0,88	0,93	1,02	0,97

Примечание: * — контрольный смазочный материал без введенной присадки.

Таблица 2 — Граничные и эталонные значения критериев оценки исследуемых пластичных смазочных материалов
Table 2 — Boundary and reference values of criteria for evaluation of plastic lubricants under study

Целевой параметр	Обозначения	Значения	Границы
Содержание свободных кислот, мгКОН/г	Y1	min	[0; 1]
Коллоидная стабильность, %	Y2	20	[10; 20]
Предел прочности на сдвиг, Па	Y3	200	[100; 200]
Температура каплепадения, °C	Y4	max	[203; 210]
Показатель износа, мм	Y5	min	[0,7; 1,5]

значимости 0,05 с помощью рангового коэффициента корреляции Спирмена r (рисунок 1).

Полученные оценки свидетельствуют, что изменение концентрации симбатно с показателем износа Y5 смазочного материала. Это ожидаемый результат, подтверждающий роль процессов трибополимеризации в механизмах износостойкости, — увеличение концентрации ДФА ингибирует процессы окисления и образования свободных радикалов в масле при трении, что снижает интенсивность образования трибопленок на контактирующих поверхностях.

Целевые параметры Y1...Y3 демонстрируют довольно высокую отрицательную корреляцию с концентрацией ДФА. В свою очередь концентрация ингибитора окисления практически не влияет на температуру каплепадения Y4.

Для определения содержания антиокислителя, обеспечивающего наилучший комплекс характеристик Y1...Y5 смазочного материала, использовался метод линейной свертки путем введения интегрального показателя содержания. Для этого значения Y1...Y5 приводились к нормированным значениям согласно следующим условиям.

1. Большее значение показателя означает лучшее качество:

$$z_{ij} = \frac{y_{ij} - y_{j\min}}{y_{j\max} - y_{j\min}}. \quad (1)$$

2. Большее значение показателя означает худшее качество:

$$z_{ij} = \frac{y_{j\max} - y_{ij}}{y_{j\max} - y_{j\min}}. \quad (2)$$

3. При использовании эталонных значений $x_{j\text{opt}}$:

$$z_{ij} = 1 - \frac{|y_{ij} - y_{j\text{opt}}|}{\max\{y_{j\text{opt}} - y_{j\min}; y_{j\max} - y_{j\text{opt}}\}}, \quad (3)$$

где z_{ij} — нормированное значение j -го показателя при i -м содержании присадки $X_i = 0; 0,1; 0,5; 1,0; 3,0; 5,0; 10,0\%$, $j = 1, \dots, 5$.

Интегральный показатель R_i эффективности смазочного материала, характеризующий отклонение показателей от эталонных значений в пятимерном пространстве признаков при заданном X содержании ДФА (масс.%), определялся по формуле:

$$R_i = \sqrt{\sum_{j=1}^5 (1 - z_{ij})^2}. \quad (4)$$

Наименьшее значение интегрального показателя R_i определяет оптимальное значение содержания ДФА (масс.%) с наилучшими характеристиками смазочного материала согласно критериям Y1...Y5.

Расчет по формуле (4) показывает, что концентрация ДФА (1,0 масс.%) соответствует наименьшему значению интегрального показателя $R(1,0\%) = 1,51$. Для остальных концентраций получаем $R(0,1\%) = 2,06$; $R(0,5\%) = 2,98$; $R(3,0\%) = 3,32$; $R(5,0\%) = 2,48$; $R(10,0\%) = 2,83$.

Таким образом, при сочетании сравнительно высоких, по отношению к другим образцам, показателей предела прочности на сдвиг, температуры каплепадения и низких значений содержания свободных кислот, показателя износа, а также величины коллоидной стабильности, концентрация

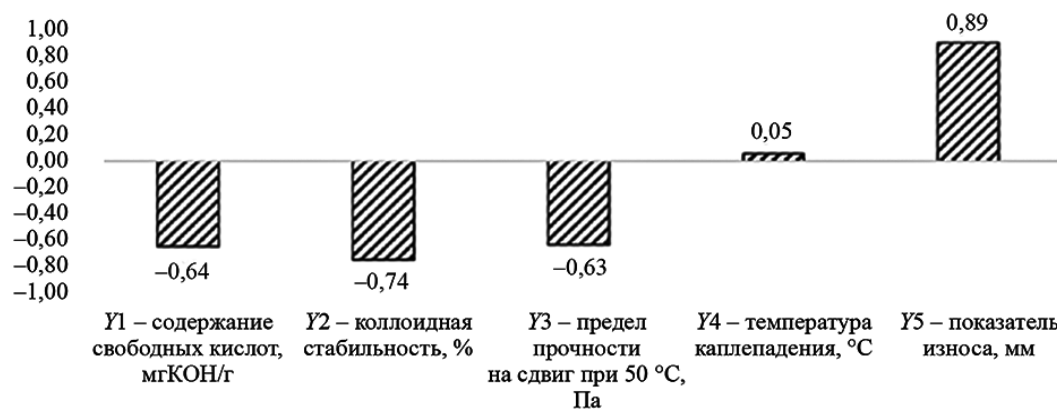


Рисунок 1 — Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена целевых параметров исследуемого пластичного смазочного материала с содержанием антиокислительной присадки (масс.%)

Figure 1 — Spearman rank correlation coefficients of target parameters of the plastic lubricant under study with antioxidant additive content (wt.%)

в 1,0 масс.% ДФА является оптимальной при условии ее введения в начале технологического процесса, предусматривающего нагрев компонентов смазки до 170 °С.

Концентрацию ДФА, равную 1,0 масс.%, можно принять в качестве опорной величины, обеспечивающей ее работоспособность в процессах эксплуатации смазки в механизмах. Однако, учитывая негативное влияние нагрева, представляется целесообразным проводить модификацию смазки при охлаждении на завершающих этапах технологического процесса, где температурные воздействия значительно ниже. При этом искомым параметром является минимальная температура модификации, обеспечивающая растворение антиокислителя и наилучшее сочетание функциональных параметров смазки.

Для решения этой задачи осуществлялось введение антиокислителя при охлаждении реактора после окончания основного технологического процесса при температурах 170, 105, 95, 85, 75 °С. Полученные результаты исследования представлены в таблице 3.

Как видно из таблицы 3, в целом температурное воздействие на антиокислительную присадку характеризуется негативным влиянием на функциональные характеристики исследуемых смазочных материалов, по сравнению со смазкой без введения присадки.

В таблице 4 отмечено изменение содержания свободных кислот в смазочных материалах по истечении 10 дней, т. е. фактически эти значения характеризуют антиокислительное действие присадки.

Принцип действия антиокислителей основан на взаимодействии как с первичными продуктами реакции окисления (пероксидами), образуя при этом неактивные нейтральные соединения, так и с алкильными радикалами (вторичными продуктами), возникающими при окислении, образуя с ними стабильные соединения, и вследствие этого дальнейшее окисление прекращается [12, 15].

Фактически, исходя из данных таблицы 4, можно отметить, что чем меньше разница содержания свободных кислот в смазке по истечении 10 дней, тем эффективнее работает антиокислительная присадка. Причем отрицательное значение разницы

Таблица 4 — Характеристика антиокислительного действия ДФА

Table 4 — Characteristics of antioxidant effect of diphenylamine

Температурное воздействие на ДФА, °С	Содержание свободных кислот, мгКОН/г		
	0 дней	10 дней*	<i>d</i>
170	0,73	0,99	0,26
105	0,282	0,442	0,16
95	0,164	0,263	0,099
85	0,208	0,221	0,013
75	0,56	0,094	-0,466
Без ДФА	4,648	5,839	1,191

Примечание: * — промежуток времени, через который наблюдается изменение содержания свободных кислот в смазочном материале

содержания свободных кислот при температурном воздействии в 75 °С на ДФА означает, что антиокислительная присадка в процессе реакции нейтрализовала как первичные, так и вторичные продукты окисления, следовательно, введенная при 75 °С антиокислительная присадка является наиболее эффективной. Помимо этого, ДФА, введенный при 85 и 95 °С в смазочный материал, обеспечивает относительную стабильность значений содержания свободных кислот, поэтому введение при этих температурах можно также считать предпочтительным.

Как можно видеть из данных таблицы 4, по истечении 10 дней после введения присадки содержание свободных кислот Y_1 в опытных образцах изменилась. На рисунке 2 представлены содержания свободных кислот Y_1 в моменты времени $t = 0$ и $t = 10$, а также отклонение $d = Y(t = 0) - Y_1(t = 10)$ за этот период. Имеет место нелинейная регрессионная зависимость отклонения d от температуры T . Наилучшей аппроксимацией выступила логарифмическая зависимость. Оцененная модель имеет вид

$$d_m = -8,09 + 1,79 \ln T, R_2 = 0,83. \quad (5)$$

Построенная модель позволяет определить отклонения d в зависимости от температуры T . График d_m приведен на рисунке 2.

При температуре 75 °С наблюдалось наибольшее отклонение между первоначальным содержа-

Таблица 3 — Функциональные характеристики кальциевой комплексной смазки с дисперсионной средой из рапсового масла при наличии ДФА от 0,1 масс.%, введенного в состав на этапе охлаждения

Table 3 — Functional characteristics of calcium complex lubricant with rapeseed oil dispersion medium in the presence of diphenylamine from 0.1 wt.% added to the composition during the cooling stage

Температурное воздействие на ДФА, °С		0*	75	85	95	105	170
Параметры	Содержание свободных кислот, мгКОН/г	4,648	0,56	0,208	0,164	0,282	0,73
	Предел прочности на сдвиг при 50 °С, Па	118	52	175	52	130	88
	Коллоидная стабильность, %	21	16,79	7,44	25,6	18,99	20,08
	Температура каплепадения, °С	237	185	246	180	243	208
	Показатель износа, мм	0,87	1,14	0,96	1,11	0,94	0,88

Примечание: * — контрольный смазочный материал без введенной присадки.

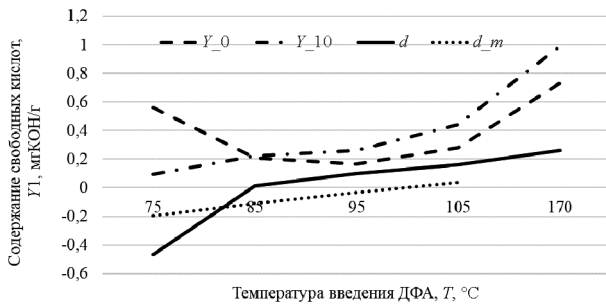


Рисунок 2 — Содержание свободных кислот Y_1 от температуры T в момент проведения эксперимента ($t = 0$) и через 10 дней ($t = 10$), фактические и модельные значения отклонения содержания кислот (d, d_m)

Figure 2 — Content of free acids Y_1 from temperature T at the time of experiment ($t = 0$) and after 10 days ($t = 10$), actual and model values of deviation of acid content (d, d_m)

нием свободных кислот (в момент времени $t = 0$) и спустя 10 дней, т. е. $d = -0,466$. При температурах 85 и 95 °C относительная стабильность ($0 < d < 0,1$) равна 0,013 и 0,099 соответственно. Согласно проведенному анализу, можно предположить, что температура введения ДФА в интервале 85–105 °C даст наилучшее сочетание химических, физико-механических и триботехнических характеристик смазочных материалов. При указанной температуре функциональные характеристики сохраняются на удовлетворительном уровне (см. таблицу 3).

Оценка взаимосвязи физико-механических и триботехнических свойств пластичного смазочного материала с дисперсионной средой из растительного сырья с температурой введения T проводилась на уровне значимости 0,05 с помощью рангового коэффициента корреляции Спирмена.

Весьма высокая обратная взаимосвязь с температурой введения ДФА имеет с показателем износа Y_5 , для которого $r(Y_5, T) = -0,90$, т. е. при увеличении температуры введения ДФА показатель износа существенно уменьшается, что согласуется с ролью окислительных механизмов противоизносного действия растительных масел.

Заметное положительное влияние температуры введения ДФА оказывает на коллоидную стабильность Y_2 : $r(Y_2, T) = 0,60$, т. е. при увеличении температуры введения ДФА коллоидная стабильность увеличивается. При этом наблюдалась высокая прямая значимая взаимосвязь температуры каплепадения Y_4 с пределом прочности на сдвиг Y_3 , для которых $r(Y_4, Y_3) = 0,97$, т. е. процессы сопоставлены. Кластеризация свойств в зависимости от изменения температуры введения ДФА проводилась на основе расстояния Евклида методом полных связей. В результате Y_1 , Y_2 и Y_5 образовали отдельный кластер в пятимерном пространстве признаков.

Для определения оптимальной температуры на основе полученных свойств смазочного материала использовались разные методы многокритериальной оптимизации [17, 18]. Согласно методу линейной свертки, многокритериальная задача сводилась

к однокритериальной путем введения интегрального показателя, определяющего оптимальную температуру введения ДФА. Экспериментальные данные (см. таблицу 3) были унифицированы аналогично ранее приведенным формулам, с учетом эталонных значений для смазочных материалов (см. таблицу 2). Получено, что при заданных эталонных значениях наилучшие характеристики смазочных материалов достигаются при температуре $T = 105$ °C, для которой $R(105$ °C) = 0,47. Второй по оптимальности является температура $T = 85$ °C с $R(85$ °C) = 1,05.

Используя метод главного критерия, где в качестве основы применялся показатель износа Y_5 , с учетом ограничений (см. таблицу 2) получаем оптимальную температуру введения ДФА, обеспечивающую наилучшие физико-механические и триботехнические свойства пластичного смазочного материала с дисперсионной средой из растительного сырья, равную 105 °C. Далее следует температура 85 °C.

На основании нормативных методов многокритериальной оптимизации, которые также используют эталонные значения (см. таблицу 2) критериев Y_j ($j = 1, 2, \dots, 5$), в метриках:

$$\rho_1(Y(x), \xi_Y) = \sum_{j=1}^5 (Y_j(x) - \xi_{Y_j})^2; \quad (6)$$

$$\rho_2(Y(x), \xi_Y) = \sum_{j=1}^5 |Y_j(x) - \xi_{Y_j}|^2; \quad (7)$$

$$\rho_3(Y(x), \xi_Y) = \max |Y_j(x) - \xi_{Y_j}|. \quad (8)$$

Показано, что минимальные значения всех трех метрик соответствуют температуре введения ДФА $T = 85$ °C, на втором месте $T = 105$ °C.

Выводы. Из результатов анализа функциональных характеристик можно отметить, что введение ДФА в смазочные композиции не влияет на их показатель износа, помимо этого, при увеличении концентрации, наблюдается снижение содержания свободных кислот. Уменьшение предела прочности на сдвиг и коллоидной стабильности смазочных композиций свидетельствует о негативном влиянии антиокислителя на основные характеристики получаемого смазочного материала.

Оценка влияния концентрации ДФА на характеристики смазочного материала с помощью методов статистического и многокритериального анализа данных проведенного эксперимента позволила установить оптимальную концентрацию ДФА в 1,0 масс.% и температуру его введения 85 °C для обеспечения наилучших функциональных показателей.

Рассмотренная методика может быть использована для оптимизации функциональных показателей смазочных материалов при их изготовлении или модификации.

Работа выполнена в рамках ГПНИ «8. Материаловедение, новые материалы и технологии» подпрограммы «8.4. Многофункциональные и ком-

позиционные материалы» задания № 4.2.3 НИР 1 и при частичной финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № T22BA-003).

Список литературы

1. Фукс, И.Г. Изменения в смазочных материалах при температурном воздействии в процессе их производства и применения / И.Г. Фукс, О.Э. Гар. — М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1985. — 55 с.
2. Щербинин, А.И. Производство присадок к нефтяным маслам / А.И. Щербинин. — М.: Химия, 1981. — 165 с.
3. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение: справ. / И.Г. Анисимов [и др.]; под ред. В.М. Школьников. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Техинформ, 1999. — 596 с.
4. Scharf, T.W. Solid lubricants: a review / T.W. Scharf, S.V. Prasad // Journal of Materials Science. — 2013. — Vol. 48, iss. 2. — Pp. 511–531. — DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-012-7038-2>.
5. Donnet, C. Solid lubricant coatings: recent developments and future trends / C. Donnet, A. Erdemir // Tribology letters. — 2004. — Vol. 17, iss. 3. — С. 389–397. — DOI: <https://doi.org/10.1023/B:TRIL.0000044487.32514.1d>.
6. Modeling and simulation in tribology across scales. An overview / A.I. Vakis [et al.] // Tribology International. — 2018. — Vol. 125. — Pp. 169–199. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.02.005>.
7. Solid lubrication at high-temperatures – a review / R. Kumar [et al.] // Materials. — 2022. — Vol. 15, iss. 5. — DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15051695>.
8. Пуляев, Н.Н. Системный подход к проблеме ресурсосберегающего использования машинно-тракторных агрегатов в растениеводстве / Н.Н. Пуляев, В.Л. Пильщиков // Междунар. технико-экономический журнал. — 2019. — № 4. — С. 75–81.
9. Директива 2009/28/ЕС 23.07.2009. Статья 17. Критерии экологичности для биотоплива и биожидкостей [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://base.garant.ru/2571107/a7b26eafd8fd23d18ca4410ac5359e0e/>. — Дата доступа: 28.04.2023.
10. Смазочные композиции на основе рапсового масла / В.С. Поляков [и др.] // Изв. высш. учеб. заведений. Серия. Химия и химическая технология. — 2008. — Т. 51, № 3. — С. 58–62.
11. Прожега, М.В. Исследование ресурса и смазочных свойств пластичных смазочных материалов для подшипников качения при работе в космических условиях / М.В. Прожега, Е.О. Решиков, Н.Н. Смирнов // Трение и износ. — 2021. — Т. 42, № 6. — С. 660–669. — DOI: <https://doi.org/10.32864/0202-4977-2021-42-6-660-669>.
12. Влияние жирнокислотного состава и структуры алкильных радикалов триглицеридов растительных масел на их триботехнические характеристики / А.Я. Григорьев [и др.] // Трение и износ. — 2016. — Т. 37, № 6. — С. 755–759.
13. Неорганическая полимерная присадка к пластичным смазочным материалам / И.В. Колесников [и др.] // Трение и износ. — 2021. — Т. 42, № 5. — С. 532–538. — DOI: <https://doi.org/10.32864/0202-4977-2021-42-5-532-538>.
14. Жорник, В.И. Экологически безопасные смазочные материалы на основе смеси растительного и минерального масел / В.И. Жорник, А.В. Ивахник, А.В. Запольский // Вестн. Витебского гос. технол. ун-та. — 2022. — № 1(42). — С. 99–114. — DOI: <https://doi.org/10.24412/2079-7958-2022-1-99-114>.
15. Григорьев, Ф.А. Подбор дисперсионной среды из растительного сырья для пластичных смазочных материалов // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: мат. XXII Междунар. науч.-технич. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 28–29 апр. 2022 г.: в 2 ч. // ГГТУ им. П.О. Сухого; под общ. ред. А.А. Бойко. — Гомель, 2022. — С. 14–16.
16. Составляющие технологического процесса создания смазочных композиционных материалов, содержащих высокодисперсные частицы слоистого модификатора трения / А.Д. Бреки [и др.] // Изв. Юго-Западного гос. ун-та. — 2015. — № 4(61). — С. 19–25.
17. Зак, Ю.А. Прикладные задачи многокритериальной оптимизации / Ю.А. Зак. — М.: Экономика, 2014. — 455 с.
18. Черноруцкий, И.Г. Методы оптимизации и принятия решений / И.Г. Черноруцкий. — СПб.: Лань, 2001. — 384 с.

GRIGORIEV Feodor A.

Junior Researcher of the Department “Friction, Lubrication and Operating Resistance of Materials”¹

E-mail: grigoriev.feodor@gmail.com

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

Deputy Director for Science¹

E-mail: podgornaya@mpri.org.by

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

Head of Fundamental and Applied Mathematics Department²

E-mail: lmarchenko@gsu.by

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

Leading Researcher of the Department “Friction, Lubrication and Operating Resistance of Materials”¹

E-mail: innakov@tut.by

¹V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Republic of Belarus

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

Received 16 June 2023.

OPTIMIZATION OF CONCENTRATION OF ANTIOXIDANT ADDITIVE IN PLASTIC LUBRICANT BASED ON RAPESEED OIL

Plastic lubricant with rapeseed oil dispersion medium is considered with addition of diphenylamine antioxidant additive. Analysis of tribotechnical, chemical and physico-mechanical characteristics of the obtained lubricants with content of antioxidant additive from 0.5 to 10.0 wt.% is carried out. The effect of the additive concentration and temperature of introduction on the functional characteristics of lubricants is shown. A comprehensive method is proposed for evaluating the optimal concentration and temperature of the antioxidant additive introduction using an integral indicator, according to the lubricant total functional characteristics. It is noted that for plastic lubricant with a rapeseed oil dispersion medium and a dispersion phase based on a complex calcium thickener, the optimal temperature range for introducing an antioxidant additive is 85–95 °C at the cooling stage, at a concentration of 1.0 wt.%. In this case, the best combination of the finished product functional characteristics is achieved. Based on the proposed methodology and taking into account the experimental data, using expert criteria it is possible to optimize the concentration and temperature of introduction of antioxidant additive diphenylamine, to obtain a plastic lubricant with given characteristics.

Keywords: plastic lubricant, calcium complex thickener, rapeseed oil, friction, tribofilm, oxidation, integral indicator, modeling, environmental safety

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-3-64-66-72>

References

- Fuks I.G., Gar O.E. *Izmeneniya v smazochnykh materialakh pri temperaturnom vozdeystvii v protsesse ikh proizvodstva i primeneniya* [Changes in lubricants when exposed to temperature during production and use]. Moscow, TsNIITEneftekhimi Publ., 1985. 55 p. (in Russ.).
- Shcherbinin A.I. *Proizvodstvo prisadok k neftyanym maslam* [Production of additives for petroleum oils]. Moscow, Khimiya Publ., 1981. 165 p. (in Russ.).
- Anisimov I.G., et al. *Topliva, smazochnye materialy, tekhnicheskie zhidkosti. Assortiment i primeneniye* [Fuels, lubricants, technical fluids. Assortment and application]. Moscow, Tekhinform Publ., 1999. 596 p. (in Russ.).
- Scharf T.W., Prasad S.V. Solid lubricants: a review. *Journal of materials science*, 2013, vol. 48, iss. 2, pp. 511–531. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-012-7038-2>.
- Donnet C., Erdemir A. Solid lubricant coatings: recent developments and future trends. *Tribology letters*, 2004, vol. 17, iss. 3, pp. 389–397. DOI: <https://doi.org/10.1023/B:TRIL.0000044487.32514.1d>.
- Vakis A.I., et al. Modeling and simulation in tribology across scales: an overview. *Tribology international*, 2018, vol. 125, pp. 169–199. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.02.005>.
- Kumar R., Hussainova I., Rahmani R., Antonov M. Solid lubrication at high-temperatures — a review. *Materials*, 2022, vol. 15, iss. 5. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15051695>.
- Pulyaev N.N., Pilshchikov V.L. Sistemnyy podkhod k probleme resursosberegayushchego ispolzovaniya mashinno-traktoynykh agregatov v rasteniyevodstve [System approach to the problem of resource-saving use of machine-tractor units in crop]. *International technical and economic journal*, 2019, no. 4, pp. 75–81 (in Russ.).
- Direktiva 2009/28/EC 23.07.2009. Statya 17. Kriterii ekologichnosti dlya biotopliva i biozhidkostey* [Directive 2009/28/EC 23.07.2009. Article 17. Environmental performance criteria for biofuels and bioliquids]. Available at: <http://base.garant.ru/2571107/a7b26eafd8fd23d18ca4410ac5359e0e/> (accessed 28 April 2023) (in Russ.).
- Polyakov V.S., Nikiforova T.E., Kozlov V.A., Bazarov Yu.M. Smazochnye kompozitsii na osnove rapsovogo masla [Lubricating compositions on the base of colza oil]. *ChemChemTech*, 2008, vol. 51, no. 3, pp. 58–62 (in Russ.).
- Prozhega M.V., Reschikov E.O., Smirnov N.N. Issledovanie resursa i smazochnykh svoystv plastichnykh smazochnykh materialov dlya podshipnikov kacheniya pri rabote v kosmicheskikh usloviyakh [Research of the lifetime and lubricant properties of grease for rolling bearings operating in space conditions]. *Trenie i iznos*, 2021, vol. 42, no. 6, pp. 660–669. DOI: <https://doi.org/10.32864/0202-4977-2021-42-6-660-669> (in Russ.).
- Grigoriev A.Ya., Kavaliyova I.N., Kreivaitis R., Kupchinskas A., Padgurskas Yu. Vliyanie zhirnokislotochnogo sostava i struktury alkilnykh radikalov triglitseridov rastitelnykh masel na ikh tribotekhnicheskie kharakteristiki [Effect of fatty-acid composition and structure of alkyl radicals of plant oil triglycerides on their tribotechnical characteristics]. *Trenie i iznos*, 2016, vol. 37, no. 6, pp. 755–759 (in Russ.).
- Kolesnikov I.V., Savenkova M.A., Sychev A.P., Avilov V.V., Volyanik S.A., Kavaliyova I.N. Neorganicheskaya polimernaya prisadka k plastichnym smazochnym materialam [Inorganic polymer additive for grease lubricants]. *Trenie i iznos*, 2021, vol. 42, no. 5, pp. 532–538. DOI: <https://doi.org/10.32864/0202-4977-2021-42-5-532-538> (in Russ.).
- Zhormik V.I., Ivakhnik A.V., Zapolsky A.V. Ekologicheski bezopasnye smazochnye materialy na osnove smesi rastitel'nogo i mineral'nogo masel [Environmentally friendly lubricants based on the mixture of the vegetable and mineral oils]. *Vestnik of Vitebsk State Technological University*, 2022, no. 1(42), pp. 99–114. DOI: <https://doi.org/10.24412/2079-7958-2022-1-99-114> (in Russ.).
- Grigoriev F.A., Myshkin N.K. Podbor dispersionnoy sredy iz rastitel'nogo syr'ya dlya plastichnykh smazochnykh materialov [Selection of dispersion medium from vegetable raw materials for plastic lubricants]. *Materialy 22 Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh "Issledovaniya i razrabotki v oblasti mashinostroyeniya, energetiki i upravleniya"* [Proc. 22nd International scientific and technical conference of students, postgraduates and young scientists "Research and development in mechanical engineering, power engineering and management"]. Gomel, 2022, pp. 14–16 (in Russ.).
- Breki A.D., Tolochko O.V., Starikov N.E., Provorotov D.A., Sergeev N.N., Ageev A.V., Gvozdev A.E. Sostavlyayushchie tekhnologicheskogo protsessa sozdaniya smazochnykh kompozitsionnykh materialov, soderzhashchikh vysokodispersnyye chastitsy sloistogo modifikatora treniya [Constituents of technological process of lubricating composite materials, containing finely dispersed particles of the layered friction modifier]. *Proceedings of the Southwest State University*, 2015, no. 4(61), pp. 19–25 (in Russ.).
- Zak Yu.A. *Prikladnye zadachi mnogokriterialnoy optimizatsii* [Applied problems of multicriteria optimization]. Moscow, Ekonomika Publ., 2014. 455 p. (in Russ.).
- Chernorutskiy I.G. *Metody optimizatsii i prinyatiya resheniy* [Methods of optimization and decision making]. Saint Petersburg, Lan Publ., 2001. 384 p. (in Russ.).