
**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕХАНИКА.
ДИАГНОСТИКА ИСПЫТАНИЯ**

УДК 621.892

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЧИСЛЕННОГО МЕТОДА
И МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ТЕМПЕРАТУРЫ ЛЕГИРОВАННОГО СМАЗОЧНОГО СЛОЯ
С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ**© 2023 г. А. Тохметова^{1,*}, А. Ю. Албагачиев¹¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

*e-mail: aygerim.tokhmetova@mail.ru

Поступила в редакцию 29.04.2023 г.

После доработки 05.06.2023 г.

Принята к публикации 20.06.2023 г.

В настоящей статье проведена сравнительная характеристика методов машинного обучения и численного метода задачи определения температуры легированного смазочного слоя с экспериментальными данными. На основе метода прогонки решено одномерное уравнение теплопроводности Фурье с граничными и начальными условиями. В результате сравнения численных и прогнозных данных с экспериментами можно сделать вывод о том, что модели машинного обучения лучше предсказывают результаты по сравнению с численными данными.

Ключевые слова: моторное масло, фуллерен C₆₀, расчет температуры смазочного слоя, машинное обучение

DOI: 10.31857/S0235711923050164, **EDN:** XADLOG

В последние десятилетия установлена эффективность смазочного масла с фуллереном C₆₀, обеспечивающая антифрикционное и противоизносное действие [1–4]. Одним из препятствий к широкому распространению смазочной композиции является отсутствие методики подбора композиции легированной углеродной нанодобавки, так что создание смазочных композиций на основе масел с фуллереном C₆₀ проводится чисто эмпирически [5–7]. С учетом вышесказанного, на сегодня актуальной задачей является разработка методики подбора оптимального состава масла с нанодобавкой. В настоящей статье разработаны методики численного и прогнозного расчетов температуры смазочного слоя. Для достоверности полученных результатов вышеуказанными методами, проведено сравнение с экспериментальными данными.

Цель предлагаемой статьи – построение методик для оценки температуры легированного масла фуллереном C₆₀, а также их сравнение с экспериментальными данными.

В качестве основы исследуемых смазочных композиций использовали известное полусинтетическое моторное масло Mobil Ultra SAE 10W–40. Концентрация фуллерена в смазочном масле изменялась в пределах 0.1–2.0%.

Численное исследование. Рассмотрим краевую задачу на основе одномерного уравнения теплопроводности с применением численного метода решений [8].

Пусть температура в направлении Ox считается постоянной, при допущении, что теплофизические характеристики не зависят от температуры (рис. 1).

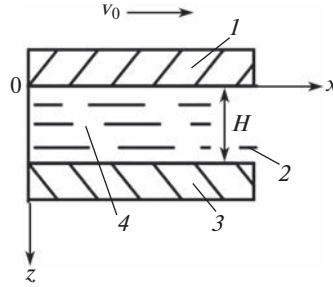


Рис. 1. Модель задачи: 1 – подвижная поверхность; 2 – зазор; 3 – неподвижная поверхность; 4 – смазочный материал.



Рис. 2. Конечно-разностная сетка толщины смазочного слоя: $z_2, z_3, \dots, z_{N-1}$ – координаты внутренних узлов; z_1, z_N – координаты граничных узлов.

Дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье имеет вид

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \quad (a = \text{const} > 0). \quad (1)$$

Начальные и граничные условия запишутся следующим образом:

$$\begin{aligned} t = 0: \quad & \theta(z, 0) = 0, \quad 0 < z < H; \\ z = 0: \quad & -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} = \alpha \tau v_0 \left(1 - \frac{z}{H}\right), \quad t > 0; \\ z = H: \quad & \theta(\infty, t) = 20, \end{aligned} \quad (2)$$

где θ – температура смазочного слоя; z – координата; α – коэффициент распределения теплоты между смазкой и вращающейся со скоростью v_0 поверхности; λ – теплопроводность смазочного слоя; H – зазор; τ – напряжение сдвига смазочного слоя.

Для численного решения задачи разобьем смазку по толщине на $N - 1$ равных промежутков, т.е. построим конечно-разностную сетку (рис. 2).

Определим значение температуры в i -м узле в момент времени $t = t_n = nk$ как $\theta(z_i, t_n) = \theta_i^n$. Здесь k – шаг интегрирования по временной координате; n – номер шага по времени.

Далее заменим дифференциальные операторы в (1) на их конечно-разностные аналоги. Будем пользоваться неявной схемой

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial t} &= \frac{\theta_i^{n+1} - \theta_i^n}{k}, \\ \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} &= \frac{\theta_{i+1}^{n+1} - 2\theta_i^{n+1} + \theta_{i-1}^{n+1}}{h^2}. \end{aligned}$$

В результате аппроксимации частных производных соответствующими конечными разностями получаем следующую систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$\rho c \frac{\theta_i^{n+1} - \theta_i^n}{k} = \lambda \left(\frac{\theta_{i+1}^{n+1} - 2\theta_i^{n+1} + \theta_{i-1}^{n+1}}{h^2} \right), \quad i = 2, \dots, N-1, \quad n \geq 0. \quad (3)$$

Полученную систему можно свести к наиболее общему виду

$$A_i \theta_{i+1}^{n+1} - B_i \theta_i^{n+1} + C_i \theta_{i-1}^{n+1} = F_i, \quad (4)$$

где $A_i = C_i = \frac{\lambda}{h^2}$, $B_i = \frac{2\lambda}{h^2} + \frac{\rho c}{k}$, $F_i = -\frac{\rho c}{k} \theta_i^n$.

Уравнения (4) называются трехточными разностными уравнениями второго порядка. Система (4) имеет трехдиагональную структуру, поэтому рассматриваем нестационарную задачу. Такую систему необходимо решать на каждом шаге по времени.

Предположим, что существуют такие наборы чисел α_i и β_i ($i = \overline{1, N-1}$), при которых

$$\theta_i^{n+1} = \alpha_i \theta_i^{n+1} + \beta_i, \quad (5)$$

т.е. система уравнений (4) преобразуется в двухточечное уравнение первого порядка (5). Подставив выражение (5) в уравнение (4) получаем

$$\theta_i^{n+1} = \frac{A_i}{B_i - C_i \alpha_{i-1}} \theta_i^{n+1} + \frac{C_i \beta_{i-1} - F_i}{B_i - C_i \alpha_{i-1}}. \quad (6)$$

Последнее равенство имеет вид (5), если при $i = 2, 3, \dots, N-1$ выполняются соотношения

$$\alpha_i = \frac{A_i}{B_i - C_i \alpha_{i-1}}, \quad \beta_i = \frac{C_i \beta_{i-1} - F_i}{B_i - C_i \alpha_{i-1}}. \quad (7)$$

Для определения α_i и β_i по (7) необходимо знать α_1 и β_1 , которые находятся из левого граничного условия.

Разложим функцию $\theta(z)$ в ряд Тейлора в окрестности точки $z = 0$ до членов второго порядка относительно h : $\theta_2^{n+1} = \theta_1^{n+1} + h \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=0}^{n+1} + h^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \Big|_{z=0}^{n+1}$.

Используя соотношение (1) получим

$$\begin{aligned} \theta_2^{n+1} &= \theta_1^{n+1} + h \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=0}^{n+1} + \frac{h^2}{2a} \frac{\partial \theta}{\partial t} \Big|_{z=0}^{n+1}; \\ \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=0}^{n+1} &= \frac{1}{h} \theta_2^{n+1} - \frac{1}{h} \theta_1^{n+1} - \frac{h}{2a} \frac{\partial \theta}{\partial t} \Big|_{z=0}^{n+1} = -\frac{\alpha \tau v_0}{\lambda} \left(1 - \frac{z}{H} \right). \end{aligned}$$

Тогда

$$\theta_1^{n+1} = \frac{2ak}{2ak + h^2} \theta_2^{n+1} + \frac{h^2}{2ak + h^2} \theta_1^{n+1} + \frac{2ah\tau\alpha k v_0}{\lambda(2ak + h^2)} \left(1 - \frac{z}{H} \right).$$

Таким образом,

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{2a\tau}{2a\tau + h^2}, \\ \beta_1 = \frac{h^2}{2a\tau + h^2} \theta_1^n + \frac{2ah\tau_1\alpha\tau v_0}{\lambda(2a\tau + h^2)} \left(1 - \frac{z}{H} \right). \end{cases} \quad (8)$$

Таблица 1. Значения метрик на тестовых данных

Классификация	RMSE
XGBoost	1.19921
LightGBM	5.84509
CatBoost	0.851235
Decision Tree	1.14564
Random Forest	1.14564
Linear Regression	3.36452

На правой границе температура $\theta|_{z=H} = 20$.

Численное решение дифференциального уравнения теплопроводности Фурье (1) с начальными и граничными условиями (2) получили методом прогонки. Была разработана программа на языке программирования Python, с использованием программных библиотек Pandas, Numpy и matplotlib.

Машинное обучение. Проведен сравнительный анализ классификаторов по задаче определения температуры легированного смазочного слоя фуллереном C_{60} . Данные обучения и тестирования представлены в файлах *csv*. Данные содержат два анализируемых параметра. Целевой признак – температура смазочного слоя с фуллереном C_{60} . Для обучающих классификаторов набор данных был разделен на обучающую и тестовую выборки в соотношении 2 : 1, количество записей для обучающих классификаторов составляет 32, а количество записей для тестирования 16.

Для всех классификаторов рассчитывается метрика RMSE (табл. 1) для тестовых данных, и результаты сравнения классификаторов представлены в виде рис. 3.

Изучены следующие алгоритмы: Linear Regression, XGBoost, LightGBM, CatBoost, Decision Tree, Random Forest [9, 10]. Для каждого из алгоритмов построен классификатор с использованием библиотек Python, вычислена метрика RMSE, которые могут

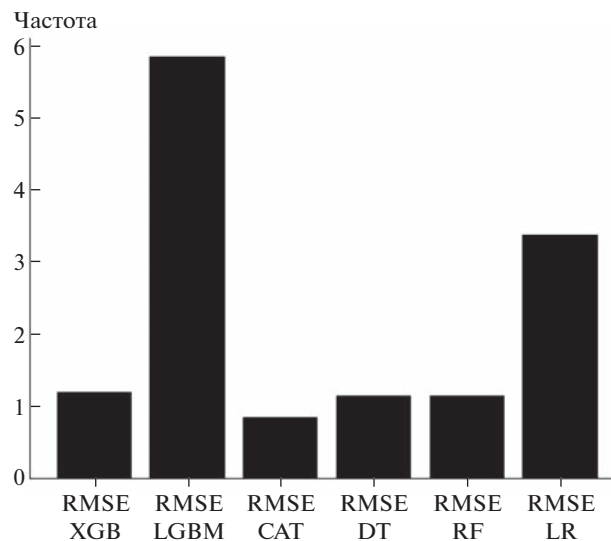


Рис. 3. Значения метрик на тестовых данных.

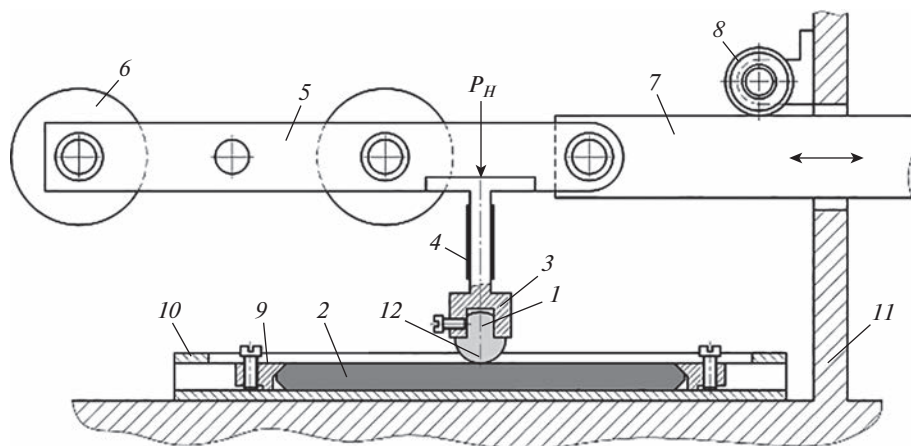


Рис. 4. Рабочая часть машины трения ПРУ: 1 – подвижный образец; 2 – неподвижный образец; 3 – тензобалка с держателем подвижного образца; 4 – тензорезистор; 5 – рычаг; 6 – груз; 7 – шток; 8 – ролик; 9 – прижим; 10 – держатель неподвижного образца; 11 – основание установки; 12 – термopapa.

определить наиболее эффективную модель. По совокупности всех показателей Cat-Boost имеет самое низкое значение RMSE. Linear Regression и LightGBM показывают худшие результаты.

Метод экспериментальных исследований. Исследования смазочных материалов проводились при режиме граничного трения, реализованном на машине ПРУ-2 с возвратно-поступательным движением по схеме “цилиндр–плоскость” (рис. 4).

При применении такой схемы происходит трение скольжения между цилиндрической поверхностью подвижного образца и неподвижной пластиной (рис. 5).

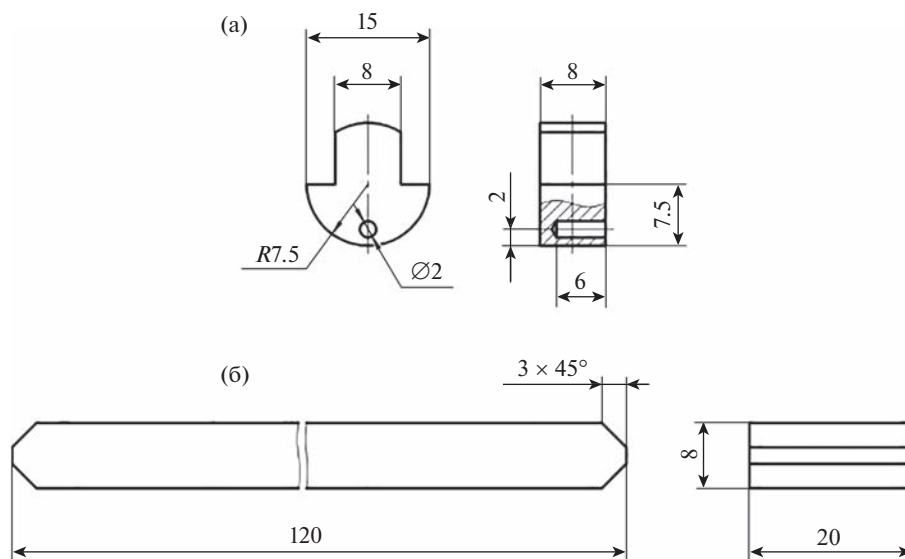


Рис. 5. Схемы образцов: (а) – подвижный образец; (б) – неподвижный образец.

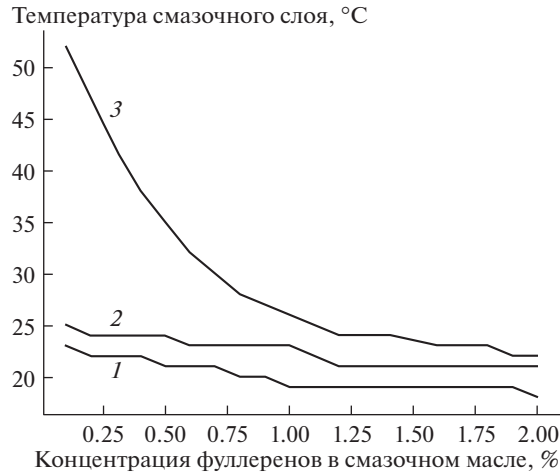


Рис. 6. Зависимость температуры смазочного слоя от концентрации фуллеренов в смазочном масле: 1 – 72 Н; 2 – 112 Н; 3 – 200 Н.

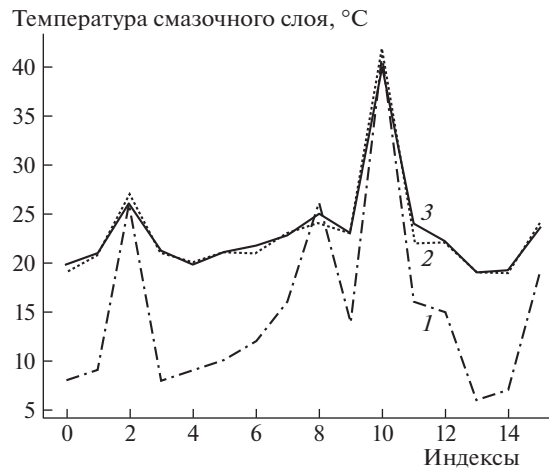


Рис. 7. Сравнение численных и прогнозных данных с экспериментальными данными: 1 – численные данные; 2 – прогнозные данные с алгоритмом CatBoost; 3 – экспериментальные данные.

Были выбраны следующие режимы работы пары трения: скорость скольжения 100 циклов в минуту; нагрузка на образец варьируется в диапазоне 72–200 Н. Скорость перемещения изменяется по синусоидальному закону. Привод на основе кривошипно-шатунного механизма. Амплитуда перемещения составляет 80 мм. Продолжительность одного испытания составляет 1 час. В ходе испытаний фиксировали показания температуры.

На рис. 6 показано изменение температуры смазочного слоя между сопряженными поверхностями в зависимости от концентраций фуллеренов C_{60} в смазочной композиции при скорости скольжения 100 циклов в минуту.

Анализ результатов испытаний (рис. 6), позволяет сделать вывод, что используя фуллереновые добавки можно уменьшить температуру по сравнению со смазочным маслом.

Сравнение численных и прогнозных данных с экспериментальными данными. Графические зависимости опытных и теоретических данных температуры смазочного слоя показаны на рис. 7. Сравнительный анализ этих данных показал хорошую корреляцию. Значения экспериментальных данных отличаются от численных не более чем на 16%. Однако, алгоритм машинного обучения CatBoost показал лучшие результаты по сравнению с численными данными. Вычисления и наборы данных доступны на GitHub.

Выводы. Проведено сравнение численных и прогнозных данных температуры легированного смазочного слоя фуллереном C_{60} с экспериментальными значениями. Получено решение одномерного уравнения Фурье с граничными и начальными условиями методом прогонки. Исследованы различные алгоритмы машинного обучения задачи определения градиента температуры легированного смазочного слоя: Linear Regression, XGBoost, LightGBM, CatBoost, Decision Tree, Random Forest. Для каждого из алгоритмов, с использованием библиотек для языка Python построен классификатор и была рассчитана метрика, на основе которой построена наиболее эффективная модель CatBoost. Из анализа данных следует, что у прогнозной модели CatBoost хорошая корреляция с экспериментальными данными, по сравнению с численными данными.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zheng Z., Guo Z., Liu W. et al. Low friction of superslippy and superlubricity // A review. Friction. 2023. V. 11. P. 1121.
2. Meng Y., Xu J., Ma L. et al. A review of advances in tribology // In 2020–2021. Friction. 2022. V. 10. P. 1443.
3. Буяновский И.А., Хрущев М.М., Самусенко В.Д. Алмазоподобные углеродные покрытия: трибологическое поведение при граничной смазке. Часть II. Смазка химически модифицированным слоем // Материаловедение. 2021. № 10. С. 3.
4. Kim B.K., Hyun J.S., Kim Y.H. et al. Effect of Boundary Layer Modification and Enhanced Thermal Characteristics on Tribological Performance of Alumina Nanofluids Dispersed in Lubricant Oil // Experimental Techniques. 2022. № 47. P. 737.
5. Duan L., Li J., Duan H. Nanomaterials for lubricating oil application // A review. Friction. 2023. V. 11. P. 647.
6. Тохметова А.Б., Михеев А.В., Тананов М.А. Исследования трибологических свойств моторного масла с содержанием фуллеренов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2022. № 4. С. 108.
7. Тухтаров А.Р., Хузин А.А., Джемилев У.М. Фуллеренсодержащие смазочные материалы: достижения и перспективы (обзор) // Нефтехимия. 2020. № 1. С. 125.
8. Strohmaier A., Waters A. Analytic properties of heat equation solutions and reachable sets // Math. Z. 2022. V. 302. P. 259.
9. Hancock J.T., Khoshgoftaar T.M. CatBoost for big data: an interdisciplinary review // J Big Data. 2020. V. 7. P. 94.
10. Шрам В.Г., Агафонов Е.Д., Лысянников А.В., Лысянникова Н.Н. Прогноз термоокислительных свойств смазочного масла с использованием методов машинного обучения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 12. С. 576.