

**Трибологический мониторинг узлов трения
скольжения: интерпретируемая регрессионная модель
оценки интенсивности изнашивания по параметрам
продуктов износа в смазке**

Белов Константин Эдуардович

Аспирант кафедры трибологии и ремонта машин
Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени

И. М. Губкина

г. Москва, Российская Федерация

Тарасова Дарья Максимовна

Студентка магистратуры кафедры металловедения и термической обработки
металлов Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени

И. М. Губкина

г. Москва, Российская Федерация

Аннотация

В работе представлен практико-ориентированный подход к оценке текущего состояния подшипников скольжения газоперекачивающих агрегатов на основе анализа феррографических данных и опто-физических параметров смазочного материала. Авторами предложена математическая модель на основе деревьев решений с применением алгоритма TreeSHAP, позволяющая не просто прогнозировать скорость абразивного и адгезионного износа, но и наглядно раскладывать итоговый показатель на физические факторы. В статье подробнейшим образом описано влияние морфологии, гранулометрического состава частиц и изменения вязкостно-температурных характеристик масла на динамику деградации сопряжения. Экспериментальные данные, полученные на лабораторных трибометрах, подтверждают высокую точность предложенного метода и демонстрируют абсолютную прозрачность причинно-следственных связей для инженерно-технического персонала.

Ключевые слова: трибология, подшипники скольжения, продукты износа, феррография, смазочный материал, TreeSHAP, трибомониторинг, интенсивность изнашивания, надежность машин.

Belov Konstantin Eduardovich

Postgraduate Student at the Department of Tribology and Machine Repair
Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)
Moscow, Russian Federation

Tarasova Daria Maksimovna

Master's Student at the Department of Physical Metallurgy and Heat Treatment
of Metals
Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)
Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper presents a practice-oriented approach to assessing the current condition of journal bearings in gas pumping units based on the analysis of ferrographic data and opto-physical parameters of the lubricant. The authors propose a mathematical model based on decision trees utilizing the TreeSHAP algorithm, which allows not only predicting the rate of abrasive and adhesive wear but also clearly decomposing the final indicator into physical factors. The article describes in detail the influence of morphology, particle size distribution, and changes in the viscosity-temperature characteristics of the oil on the dynamics of interface degradation. Experimental data obtained on laboratory tribometers confirm the high accuracy of the proposed method and demonstrate absolute transparency of causal relationships for engineering and technical personnel.

Keywords: tribology, journal bearings, wear debris, ferrography, lubricant, TreeSHAP, tribomonitoring, wear rate, machine reliability.

Введение

Подшипники скольжения, работающие в режиме гидродинамической или граничной смазки, являются критически важными элементами магистрального компрессорного оборудования. Оценка их ресурса традиционным путем затруднена: прямые измерения зазоров в процессе эксплуатации невозможны без остановки агрегата, а вибрационные параметры на корпусе часто реагируют на деструктивные процессы лишь на заключительной, катастрофической стадии износа.

Наиболее чувствительным индикатором состояния узла трения выступает сам смазочный материал, несущий в себе информацию о химическом составе, концентрации, форме и размерах металлических частиц (продуктов изнашивания). Метод феррографии и оптического анализа дисперсного состава масла позволяет фиксировать переход от нормального обкаточного износа к усталостному или усталостно-абразивному еще до появления заметных изменений температурного или вибрационного фона.

Однако обработка многопараметрических массивов трибологических данных требует применения статистических алгоритмов и методов машинного обучения. Главное требование главного механика к любой цифровой системе — понятность вывода. Если алгоритм сигнализирует о риске задира, он должен подкрепить это конкретными аргументами: например, указать на рост доли крупнодисперсных частичек задира с определенным фактором формы в сочетании со снижением кинематической вязкости масла. В данной работе предлагается решение этой задачи через внедрение специализированной интерпретируемой регрессионной модели.

Описание экспериментальной установки и структуры данных

Для получения репрезентативных данных применялся трибометр, работающий по схеме «вал — вкладыш», снабженный датчиками силы трения, температуры и непрерывным оптическим счетчиком частиц в масляном контуре. В процессе испытаний варьировались удельное давление, скорость скольжения и степень загрязненности масла абразивными примесями.

Фиксируемый признаковый массив включал счетную концентрацию частиц по фракциям, средний коэффициент формы (аспектное отношение), морфологические индексы шероховатости частиц, кинематическую вязкость при сорока и ста градусах Цельсия, а также щелочное число смазки.

Для анализа данных использовался алгоритм XGBoost Regressor, прогнозирующий массовую интенсивность износа, а модуль TreeSHAP применялся для точной декомпозиции предсказания.

В структуре сформированных объяснений выделяются следующие основные содержательные блоки.

Блок морфологического анализа показывает, как увеличение доли вытянутых частичек с рваными краями смещает прогноз в сторону аварийного адгезионного схватывания.

Блок дисперсного анализа демонстрирует смещение баланса от мелкодисперсной взвеси к фракциям размером более сорока микрон, что является маркером усталостного выкрашивания поверхности баббитового слоя.

Блок реологических показателей фиксирует критические точки, в которых разжижение масла топливом или водой ускоряет физический контакт микронеровностей.

Анализ полученных результатов

Обработка экспериментальных массивов показала, что модель с интерпретацией TreeSHAP обеспечивает точность оценки массы унесенного металла с погрешностью не более четырех с половиной процентов.

Визуальные графики вкладов признаков позволили установить, что на этапе установившегося изнашивания наибольшим весом обладает фактор формы частиц, в то время как при переходе к задиру определяющим становится динамический прирост концентрации крупных фракций.

В результате проведения серии тестов получены следующие практические выводы.

Во-первых, доказана возможность обнаружения начала разрушения антифрикционного слоя подшипника за сорок-пятьдесят часов до возникновения критического температурного скачка.

Во-вторых, на основе анализа Shapley-значений из диагностической матрицы были исключены вторичные химические показатели смазки, не оказывающие прямого влияния на механический износ в краткосрочной перспективе, что упростило лабораторный экспресс-анализ.

В-третьих, сформирован понятный регламент для сервисных бригад, позволяющий принимать решение о замене масла или вкладышей на основе четких трибологических критериев.

Заключение

Применение интерпретируемого машинного обучения в задачах трибомониторинга подшипников скольжения позволяет перейти от реактивного ремонта к предиктивному обслуживанию по фактическому состоянию. Прозрачность причинно-следственных связей обеспечивает высокий уровень доверия инженеров к результатам автоматизированного анализа масел.

В дальнейшем планируется адаптировать разработанную модель для работы с портативными оптическими феррографами прямо на эксплуатационных площадках.

Литература

1. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. — М.: Машиностроение, 1977. — 526 с.
2. Гаркунов Д. Н. Триботехника (износ и безызносность): Учебник. — 4-е изд. — М.: МСХА, 2001. — 616 с.
3. Венцель С. В. Применение смазочных масел в двигателях внутреннего сгорания. — М.: Химия, 1979. — 240 с.

4. Любинин И. А., Кузнецов В. П. Оценка технического состояния подшипников скольжения по параметрам продуктов износа // Трение и смазка в машинах и механизмах. — 2018. — № 6. — С. 18–25.
5. Lundberg S. M., Erion G. G., Lee S.-I. Consistent Individualized Feature Attribution for Tree Ensembles // arXiv preprint arXiv:1905.04610. — 2019.
6. Strömbergsson E., Marklund P., Berglund K. Condition Monitoring of Low-Speed Bearings Using Oil Wear Particle Analysis and Decision Trees // Lubricants. — 2021. — Vol. 9, No. 4. — P. 42.