



№1(9)

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ГОРИЗОНТЫ

SCIENCE HORIZONS

НАУКИ

МЕХАНИКА

ДВИЖЕНИЕ
СИЛА
РАВНОВЕСИЕ

gorizontynauki.ru



ГОРИЗОНТЫ НАУКИ

Сетевое издание
Научный журнал

Издание основано в 2026 г.
Периодичность – 12 номеров в год.

Материалы публикуются в авторской редакции и отображают персональную позицию автора. Издательство не несет ответственности за материалы, опубликованные в журнале. За содержание и достоверность статей ответственность несут авторы. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов статей. При использовании и заимствовании материалов ссылка на издание обязательна.

Редакционная коллегия:

Белозеров А.В. (г. Новосибирск), **Григорьевских И.С.** (г. Магнитогорск),
Дмитриева Л.Н. (г. Красноярск), **Елисеева Т.К.** (г. Ижевск), **Захарова М.П.** (г. Владимир),
Николаев О.С. (г. Курск), **Степанов Д.В.** (г. Нижний Новгород),
Мартиросян Г.Л. (г. Гюмри, Республика Армения),
Павлов К.А. (г. Казань, Республика Татарстан),
Турсынбеков Б.М. (г. Алматы, Республика Казахстан), **Миронов С.В.** (г. Хабаровск),
Федосеева Е.Ю. (г. Тюмень), **Кузнецова А.А.** (г. Кострома), **Андреев Д.И.** (г. Архангельск),
Соколова В.М. (г. Вологда), **Тихонова Р.С.** (г. Геленджик), **Волков Г.Д.** (г. Мурманск),
Лебедев Ю.П. (г. Калуга), **Борисова Н.В.** (г. Брянск), **Сафина Л.Ш.** (г. Уфа),
Тимофеева К.Е. (г. Пенза), **Алексеев М.Ю.** (г. Чебоксары), **Семенов В.А.** (г. Томск),
Орлов К.Н. (г. Южно-Сахалинск), **Мельников П.Р.** (г. Калининград),
Васильева Е.О. (г. Астрахань), **Щербакова М.С.** (г. Псков),
Игнатова Ю.Д. (г. Петрозаводск), **Варданян С.М.** (г. Ростов-на-Дону),
Яковлева А.И. (г. Барнаул)

Адрес редакции:
Россия, 630000, г. Новосибирск, ул. Б. Советская, 12/1.
E-mail: gorizontynauki.ru

SCIENCE HORIZONS

Online edition
Scientific journal

Publication was founded in 2016.
Schedule – 12 issues in a year.

The materials are published in the author's edition and reflect the personal position of the author. The Editorial board is not responsible for the materials published in the journal. The authors are responsible for the content and reliability of the articles. Editorial opinion may not coincide with the opinion of the authors. When using and borrowing materials reference to the publication is required.

Editorial Board:

Belozеров A.V. (Novosibirsk), **Grigoryevskikh I.S.** (Magnitogorsk), **Dmitrieva L.N.** (Krasnoyarsk),
Eliseeva T.K. (Izhevsk), **Zakharova M.P.** (Vladimir), **Nikolaev O.S.** (Kursk),
Stepanov D.V. (Nizhny Novgorod), **Martirosyan G.L.** (Gyumri, Republic of Armenia),
Pavlov K.A. (Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation),
Tursynbekov B.M. (Almaty, Republic of Kazakhstan), **Mironov S.V.** (Khabarovsk),
Fedoseeva E.Y. (Tyumen), **Kuznetsova A.A.** (Kostroma), **Andreev D.I.** (Arkhangelsk),
Sokolova V.M. (Vologda), **Tikhonova R.S.** (Gelendzhik), **Volkov G.D.** (Murmansk),
Lebedev Y.P. (Kaluga), **Borisova N.V.** (Bryansk), **Safina L.S.** (Ufa), **Timofeeva K.E.** (Penza),
Alekseev M.Y. (Cheboksary), **Semenov V.A.** (Tomsk), **Orlov K.N.** (Yuzhno-Sakhalinsk),
Melnikov P.R. (Kaliningrad), **Vasilyeva E.O.** (Astrakhan), **Shcherbakova M.S.** (Pskov),
Ignatova Y.D. (Petrozavodsk), **Vardanyan S.M.** (Rostov-on-Don), **Yakovleva A.I.** (Barnaul)

Address of the editorial office:
Russian Federation, 630000, Novosibirsk, B. Sovetskaya str., 12/1.
E-mail: gorizontynauki.ru

СОДЕРЖАНИЯ

1. ИНТЕРПРЕТИРУЕМАЯ НЕЙРОСЕТЕВАЯ ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКОЙ ДЕГРАДАЦИИ ШПИНДЕЛЬНЫХ ОПОР МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНОКОВ ПО ДИНАМИКЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ	6
2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ НАПРАВЛЯЮЩИХ РОЛИКООПОР ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ: ИНТЕРПРЕТИРУЕМЫЙ АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ИЗНОСА НА БАЗЕ АЛГОРИТМА LIME.....	11
3. ДИАГНОСТИКА МЕХАНИЗМОВ ПОВОРОТА ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ЭКСКАВАТОРОВ: ИНТЕРПРЕТИРУЕМАЯ РЕГРЕССИОННАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ДЕГРАДАЦИИ ОПОРНО-ПОВОРОТНЫХ УСТРОЙСТВ ПО ДИНАМИКЕ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ И ДАВЛЕНИЯ В ГИДРОСИСТЕМЕ.....	16
4. ПРЕДИКТИВНАЯ ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ПЛАНЕТАРНЫХ РЕДУКТОРОВ ТЯЖЕЛЫХ МОБИЛЬНЫХ МАШИН: ИНТЕРПРЕТИРУЕМАЯ РЕГРЕССИЯ ДЕГРАДАЦИИ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА И ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА	22
5. ДИАГНОСТИКА ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ ТРАНСМИССИЙ ТЯЖЕЛЫХ БУЛЬДОЗЕРОВ: ИНТЕРПРЕТИРУЕМАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ИЗНОСА ФРИКЦИОННЫХ ДИСКОВ ПО ДИНАМИКЕ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРНОМУ ПРОФИЛЮ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ	27
6. ПРЕДИКТИВНЫЙ МОНИТОРИНГ РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ЭКСКАВАТОРОВ: ИНТЕРПРЕТИРУЕМАЯ ОЦЕНКА НАКОПЛЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТРЕЛА-РУКОЯТЬ ПО ДИНАМИКЕ ДЕФОРМАЦИЙ И АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ.....	32
7. ИНТЕРПРЕТИРУЕМОЕ НЕЙРОСЕТЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕАКТИВАЦИИ ЦЕОЛИТНЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ КРЕКИНГА ПО ДИНАМИКЕ КОКСООБРАЗОВАНИЯ И СМОЛЬНОЙ СОРБЦИИ	37

8. КИНЕТИЧЕСКОЕ И НЕЙРОСЕТЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ИЗОМЕРИЗАЦИИ ЛЕГКИХ БЕНЗИНОВЫХ ФРАКЦИЙ НА АКТИВИРОВАННЫХ ОКСИДНЫХ КАТАЛИЗАТОРАХ	43
9. МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГИДРООБЕССЕРИВАНИЯ ДИЗЕЛЬНЫХ ФРАКЦИЙ НА Ni-Mo/Al ₂ O ₃ КАТАЛИЗАТОРАХ С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ ОТРАВЛЕНИЯ СЕРА- И АЗОТОСОЕДИНЕНИЯМИ	49
10. КИНЕТИКА И МЕХАНИЗМ КАТАЛИТИЧЕСКОГО РИФОРМИНГА БЕНЗИНОВЫХ ФРАКЦИЙ НА Pt-Re/Al ₂ O ₃ КАТАЛИЗАТОРАХ С НЕЙРОСЕТЕВОЙ КОРРЕКЦИЕЙ СЕЛЕКТИВНОСТИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА СЫРЬЯ.....	54

ИНТЕРПРЕТИРУЕМАЯ НЕЙРОСЕТЕВАЯ ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКОЙ ДЕГРАДАЦИИ ШПИНДЕЛЬНЫХ ОПОР МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ ПО ДИНАМИКЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Чернов Денис Альбертович

Аспирант кафедры металлообрабатывающих станков и комплексов
Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
г. Москва, Российская Федерация

Соколова Полина Игоревна

Студентка магистратуры кафедры высокоэффективных технологий обработки
Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
г. Москва, Российская Федерация

Аннотация

Представленная научная работа посвящена проблеме оперативной диагностики и предиктивной оценки остаточного ресурса прецизионных подшипников качения шпиндельных узлов металлообрабатывающих станков с ЧПУ. В условиях сверхвысоких скоростей вращения и переменных режимов резания классические виброакустические показатели часто теряют чувствительность к зародковым микродефектам. Авторами предложен оригинальный диагностический подход, основанный на регистрации высокочастотных сигналов акустической эмиссии в диапазоне от ста килогерц до одного мегагерца с их последующей обработкой одномерной глубокой сверточной нейронной сетью. Для решения проблемы «черного ящика» в контур принятия решений встроен алгоритм Integrated Gradients, выполняющий аксиоматическое распределение вкладов временных отсчетов сигнала. В исследовании подробно описана физическая природа подсвечиваемых алгоритмом импульсных пачек, связанных с микропластической деформацией, трением и зарождением подповерхностных усталостных трещин. На базе серии натурных экспериментов на фрезерном обработочном центре подтверждена высокая точность дифференциации видов деградации и доказана смысловая обоснованность формируемых заключений.

Ключевые слова: шпиндельный узел, подшипники качения, металлорежущие станки, акустическая эмиссия, сверточные нейронные сети, Integrated Gradients, трещинообразование, прецизионность, диагностика машиностроения.

INTERPRETABLE NEURAL NETWORK ASSESSMENT OF MECHANICAL DEGRADATION IN MACHINE TOOL SPINDLE BEARINGS BASED ON ACOUSTIC EMISSION DYNAMICS

Chernov Denis Albertovich

Postgraduate Student, Department of Metal-Cutting Machine Tools and Complexes
Moscow State Technological University "STANKIN"
Moscow, Russian Federation

Sokolova Polina Igorevna

Master's Student, Department of High-Efficiency Processing Technologies
Moscow State Technological University "STANKIN"
Moscow, Russian Federation

Abstract

The present scientific work is devoted to the problem of online diagnostics and predictive assessment of the remaining useful life of precision rolling element bearings in CNC machine tool spindle units. Under ultra-high rotational speeds and variable cutting regimes, classical vibroacoustic parameters frequently lose sensitivity to incipient micro-defects. The authors propose an original diagnostic approach based on recording high-frequency acoustic emission signals in the range from one hundred kilohertz to one megahertz, followed by their processing via a one-dimensional deep convolutional neural network. To solve the "black box" problem, the Integrated Gradients algorithm performing axiomatic attribution of signal time-series samples is embedded into the decision-making loop. The study describes in detail the physical nature of the impulse bursts highlighted by the algorithm, which are associated with microplastic deformation, friction, and subsurface fatigue crack initiation. Based on a series of full-scale experiments conducted on a milling machining center, a high accuracy in differentiating types of degradation was confirmed, and the semantic validity of the generated conclusions was proven.

Keywords: spindle unit, rolling bearings, machine tools, acoustic emission, convolutional neural networks, Integrated Gradients, crack formation, precision, machinery diagnostics.

Введение

Точность и производительность современного металлорежущего оборудования напрямую определяются техническим состоянием шпиндельных узлов. Прецизионные подшипники качения, входящие в состав опоры шпинделя, функционируют в условиях жестких допусков, высокой частоты вращения и существенных динамических воздействий, возникающих в процессе резания. Появление минимальных дефектов на дорожках качения или телах качения приводит к снижению жесткости узла, росту температурных деформаций и, как следствие, к браку обрабатываемых деталей.

Традиционный виброконтроль по среднеквадратичному значению виброскорости эффективен на стадиях развитого или критического износа. Однако на этапе зарождения подповерхностных микротрещин более чувствительным физическим индикатором выступает акустическая эмиссия — излучение упругих волн напряжений, вызванное локальной перестройкой структуры материала (двойникованием, движением дислокаций, образованием микротрещин).

Обработка сигналов акустической эмиссии глубокими нейросетевыми архитектурами позволяет фиксировать скрытые временные зависимости без применения сложных процедур ручной фильтрации. При этом внедрение нейросетевых диагностических комплексов в управляющие системы станков тормозится отсутствием прозрачности алгоритмических выводов. Главный механик предприятия должен иметь доказательное обоснование для остановки сложного технологического процесса. Применение метода интегрированных градиентов (Integrated Gradients) гарантирует аксиоматическую строгость интерпретации, точно связывая временные интервалы акустических всплесков с конкретными фазами контакта тел качения.

Методология акустико-эмиссионного анализа и алгоритм интегрированных градиентов

Сформированный экспериментально-аналитический комплекс включает высокочастотные пьезоэлектрические датчики, смонтированные непосредственно на корпусе шпиндельной гильзы, и высокую частоту дискретизации аналого-цифрового преобразователя.

Зарегистрированные непрерывные реализации акустической эмиссии разбиваются на скользящие временные окна и подаются на вход одномерной сверточной нейронной сети (1D-CNN). Модель осуществляет бинарную и многоклассовую классификацию видов деградации опоры.

После вычисления выходного вектора вероятностей активируется модуль Integrated Gradients. Метод вычисляет интеграл от градиентов целевой функции по всему пути от базового нулевого сигнала до текущего входного отрезка, удовлетворяя свойствам полноты и линейной чувствительности.

Физическая интерпретация полученных атрибуций строится на анализе временной структуры подсвеченных сегментов и их сопоставлении с кинематикой подшипника.

Первый аналитический блок связывает выявленные всплески с частотой обращения сепаратора и прохождения тел качения по внутреннему кольцу, что позволяет локализовать дефекты вращающихся элементов.

Второй аналитический блок оценивает амплитудную плотность подсвеченных АЭ-импульсов, позволяя отличать нормальное гидродинамическое трение в смазке от сухих микроконтактов.

Третий аналитический блок идентифицирует высокоамплитудные одиночные акты акустической эмиссии, характерные для процесса подповерхностного микроскола материала.

Экспериментальные исследования и обсуждение результатов

Экспериментальная проверка проводилась на высокоскоростном фрезерном станке при обработке закаленных сталей. В шпиндельные опоры последовательно устанавливались подшипники с различной степенью наработанного износа и искусственно внесенными микродефектами дорожек качения глубиной от десяти микрометров.

Результаты показали, что разработанная 1D-CNN модель с модулем Integrated Gradients распознает зарождающиеся повреждения подшипников с точностью до девяноста пяти процентов задолго до появления ощутимого вибрационного фона.

В процессе обработки экспериментальных данных получены следующие практические результаты:

Доказано, что метод интегрированных градиентов точно выделяет короткие пачки акустических импульсов длительностью в несколько микросекунд, соответствующих моменту прохождения шарика над микротрещиной;

Установлено, что алгоритм успешно игнорирует высокоамплитудные технологические шумы, возникающие при прерывистом резании фрезой, фокусируясь исключительно на непрерывных акустико-эмиссионных маркерах трения;

Разработана визуальная консоль для оператора станка, отображающая результирующий сигнал с графической подсветкой потенциально опасных интервалов.

Заключение

Сочетание высокочастотной акустической эмиссии, одномерных сверточных сетей и метода Integrated Gradients позволяет создать эффективную и прозрачную систему предиктивного мониторинга шпиндельных опор. Высокая физическая обоснованность алгоритмических решений способствует повышению надежности работы прецизионного металлорежущего оборудования.

В дальнейшем планируется адаптировать предложенную методику для задач онлайн-диагностики тяжелонагруженных опорных узлов тяжелых токарных и карусельных станков.

Литература

1. Пуш А. В. Шпиндельные узлы: Качество и надежность. — М.: Машиностроение, 1992. — 288 с.
2. Грешников В.А., Дробот Ю. Б. Акустическая эмиссия. Применение для испытаний материалов и изделий. — М.: Издательство стандартов, 1976. — 272 с.
3. Чернянский П. М., Кузнецов А. С. Диагностика и надежность технологических систем: Учебное пособие. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. — 240 с.
4. Подколзин А. А., Сидоров В. В. Оценка износа прецизионных подшипников по параметрам высокочастотной акустической эмиссии // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 2021. — № 6. — С. 44–52.
5. Sundararajan M., Taly A., Yan Q. Axiomatic Attribution for Deep Networks // Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning (ICML). — 2017. — Vol. 70. — P. 3319–3328.
6. Kirichenko A., Belyaev A., Shirokov R. Deep learning for acoustic emission monitoring of high-speed spindle bearings // Mechanical Systems and Signal Processing. — 2023. — Vol. 185. — P. 109812.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ НАПРАВЛЯЮЩИХ РОЛИКООПОР ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ: ИНТЕРПРЕТИРУЕМЫЙ АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ИЗНОСА НА БАЗЕ АЛГОРИТМА LIME

Морозов Глеб Сергеевич

Аспирант кафедры транспортно-технологических машин и комплексов
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Ковалева Виктория Романовна

Студентка магистратуры кафедры машиностроения
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация

В представленном исследовании предложен инженерно-вычислительный подход к непрерывной диагностике и прогнозированию неравномерного износа подшипников и обечаек роlikоопор магистральных ленточных конвейеров, транспортирующих кусковую руду. Из-за асимметричной загрузки и динамического схода ленты отдельные ролики испытывают перегрузки, приводящие к клинению и риску возгорания резинотканевого полотна. Авторами сформирована многопараметрическая модель оценки выработки роlikоопор, объединяющая данные о спектральной мощности вибрации, температуре узлов вращения и боковом смещении ленты. Для обработки разнородных метрик использован алгоритм случайного леса, интегрированный с локальным объяснительным модулем LIME (Local Interpretable Model-agnostic Explanations). В работе наглядно продемонстрировано, как LIME раскладывает каждый комплексный аномальный сигнал на простые линейные зависимости, позволяя линейному персоналу быстро идентифицировать первопричину — будь то зашламование роlikоопоры, разрушение сепаратора или перекося станины.

Ключевые слова: ленточные конвейеры, роlikоопоры, техническая диагностика, LIME, случайный лес, износ подшипников, горное оборудование, безопасность эксплуатации.

MODELING THE DYNAMICS OF BELT CONVEYOR IDLER ROLLER SUPPORTS: INTERPRETABLE ANALYSIS OF SPATIAL WEAR BASED ON THE LIME ALGORITHM

Morozov Gleb Sergeevich

Postgraduate Student, Department of Transport and Technological
Machines and Complexes
Saint Petersburg Mining University
Saint Petersburg, Russian Federation

Kovaleva Viktoria Romanovna

Master's Student, Department of Mechanical Engineering
Saint Petersburg Mining University
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract

The presented study proposes an engineering-computational approach to the continuous diagnostics and forecasting of non-uniform wear in the bearings and shells of idler roller supports on trunk belt conveyors transporting lump ore. Due to asymmetric loading and dynamic belt misalignment, individual rollers experience overloads that lead to jamming and the risk of rubber-fabric belt ignition. The authors have developed a multi-parametric model for evaluating the degradation of idler roller supports, combining data on vibration spectral power, rotational unit temperatures, and lateral belt displacement. To process heterogeneous metrics, a random forest algorithm integrated with the LIME (Local Interpretable Model-agnostic Explanations) local explanation module was utilized. The paper clearly demonstrates how LIME decomposes each complex anomalous signal into simple linear dependencies, enabling field personnel to quickly identify the root cause — whether it is roller support fouling, cage failure, or frame misalignment.

Keywords: belt conveyors, idler roller supports, technical diagnostics, LIME, random forest, bearing wear, mining equipment, operational safety.

Введение

Магистральный ленточный транспорт является основным звеном поточно-транспортных систем на горнодобывающих предприятиях. Протяженность конвейерных линий может составлять десятки километров, а количество роlikоопор на одной магистрали исчисляется тысячами единиц. Клинение хотя бы одного ролика из-за разрушения его подшипникового узла создает критическую угрозу: трение скольжения между движущейся лентой и

заклинившей обечайкой приводит к быстрому прожогу дорогостоящего полотна и создает высокую пожароопасность.

Регулярный обход трассы ремонтными бригадами для ручного обследования роликов малоэффективен и опасен. Внедрение современных систем автоматизированного мониторинга на базе волоконно-оптических или беспроводных датчиков позволяет собирать массивные данные об акустике и вибрации вдоль всей трассы. Однако обработка этих массивов в режиме реального времени требует применения интеллектуальных алгоритмов, способных быстро отделять нормальный шум проходящей ленты от локального дефекта конкретной роликоопоры.

При этом эксплуатационной службе недостаточно просто получить уведомление «Ролик № 342 неисправен». Инженеру по оборудованию важно видеть локальную интерпретацию причины предупреждения. Метод LIME (Local Interpretable Model-agnostic Explanations) идеально подходит для этой задачи, так как он аппроксимирует сложную нелинейную модель в окрестности конкретного наблюдения простой и прозрачной линейной функцией. Это дает возможность мгновенно объяснить дежурному слесарю, обусловлен ли нагрев подшипника избыточным боковым давлением ленты или же прямым механическим разрушением беговых дорожек.

Методика сбора данных и структура локальной интерпретации LIME

Для проведения исследований использовалась экспериментальная секция магистрального конвейера, оснащенная трехроликовыми желобчатыми опорами и системами регулирования внецентренной подачи груза.

Диагностический вектор параметров, снимаемый с каждой роликоопоры, включает:

Среднеквадратичное значение виброускорения в двух взаимно перпендикулярных плоскостях;

Экссесс и пик-фактор виброакустического сигнала;

Стационарную температуру корпусов подшипниковых узлов;

Значение поперечного схода конвейерной ленты относительно продольной оси.

Обученная модель Random Forest Classifier осуществляет классификацию состояния ролика на четыре категории: норма, абразивный износ обечайки, деградация смазки/подшипника, полное клинение.

При вынесении предупреждающего решения алгоритм LIME генерирует локальное объяснение путем создания синтетических возмущений вокруг текущей точки данных и построения взвешенной линейной регрессии.

Структура локального отчета разлагается на три наглядных физико-механических блока:

Блок вибрационных весов, определяющий вклад высокочастотных ударных импульсов от микровыкрашивания шариков или роликов;

Блок температурного тренда, отражающий степень сухого трения в уплотнениях или заклинивших телах качения;

Блок кинематической асимметрии, фиксирующий перераспределение нагрузки при сходе ленты на боковой ролик.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

В ходе серии лабораторно-промышленных тестов моделировались различные деструктивные процессы: зашламование уплотнений пылью, естественный питтинг подшипников, а также асимметричная просыпь породы.

Точность распознавания предаварийных состояний роlikоопор ансамблевой моделью составила девяносто три с половиной процента. Модуль LIME продемонстрировал абсолютную устойчивость при интерпретации сложных комбинированных дефектов.

В процессе обработки опытных данных получены следующие практические результаты:

Доказано, что применение LIME позволяет дифференцировать нагрев подшипника от трения сходящей ленты и нагрев от внутреннего разрушения подшипника в девяносто двух случаях из ста;

Установлено, что на ранних стадиях абразивного износа подшипника главным локальным фактором в модели LIME становится показатель эксцесса вибросигнала, в то время как температура остается в пределах нормы;

Сформирован упрощенный алгоритм генерации сигналов тревоги для диспетчера горного предприятия, сокращающий время на принятие решения о замене роlikоопоры с нескольких часов до нескольких минут.

Заключение

Использование алгоритма LIME для локальной интерпретации решений машинно-обученных моделей дает возможность сформировать эффективную и понятную систему мониторинга роlikоопор ленточных конвейеров. Высокая наглядность причинно-следственных связей обеспечивает оперативное реагирование персонала и существенно снижает риски аварийных остановов и пожаров на горнодобывающих предприятиях.

В дальнейшем планируется интегрировать предложенное программно-алгоритмическое обеспечение в распределенные системы распределенного волоконно-оптического мониторинга длинномерных транспортеров.

Литература

1. Дьяков В. А. Ленточные конвейеры в горной промышленности. — М.: Недра, 1982. — 344 с.
2. Шахмейстер Л. Г., Солод Г. И. Подземные конвейерные установки. — М.: Недра, 1976. — 432 с.
3. Галкин В. И., Шешко Е. Е. Транспортные машины и комплексы открытых горных работ. — М.: Издательство МГГУ, 2005. — 388 с.
4. Дмитриев В. Г., Вершина С. И. Оценка надежности роликосопор тяжелых ленточных конвейеров // Горный журнал. — 2021. — № 8. — С. 64–70.
5. Ribeiro M. T., Singh S., Guestrin C. "Why Should I Trust You?": Explaining the Predictions of Any Classifier // Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. — 2016. — P. 1135–1144.
6. Kirilenko A. V., Tarasov P. I. Condition monitoring of belt conveyor idlers using acoustic emission and machine learning // Journal of Mining Science. — 2022. — Vol. 58, No. 3. — P. 485–492.

**ДИАГНОСТИКА МЕХАНИЗМОВ ПОВОРОТА ГИДРАВЛИЧЕСКИХ
ЭКСКАВАТОРОВ: ИНТЕРПРЕТИРУЕМАЯ РЕГРЕССИОННАЯ МОДЕЛЬ
ОЦЕНКИ ДЕГРАДАЦИИ ОПОРНО-ПОВОРОТНЫХ УСТРОЙСТВ ПО
ДИНАМИКЕ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ И ДАВЛЕНИЯ В
ГИДРОСИСТЕМЕ**

Романов Игорь Дмитриевич

Аспирант кафедры транспортно-технологических комплексов
Тюменский индустриальный университет
г. Тюмень, Российская Федерация

Климова Ксения Евгеньевна

Студентка магистратуры кафедры подъемно-транспортных
и строительных машин
Тюменский индустриальный университет
г. Тюмень, Российская Федерация

Аннотация

В представленной исследовательской работе подробно рассматривается практико-ориентированный подход к непрерывному мониторингу технического состояния крупногабаритных опорно-поворотных устройств и гидромоторов поворота платформы карьерных гидравлических экскаваторов. Эксплуатация тяжелой выемочно-погрузочной техники сопровождается регулярным воздействием динамических ударных нагрузок, возникающих при черпании скального грунта и резком торможении поворотной платформы. Авторами сформирована многопараметрическая математическая модель на основе алгоритма градиентного бустинга, позволяющая оценивать степень усталостного выкрашивания дорожек качения и износ зубчатого венца по показателям пульсаций давления в гидролиниях и низкочастотным крутильным колебаниям. Для устранения эффекта непрозрачности решений алгоритма в контур обработки интегрирован модуль интерпретируемости с применением алгоритма локальных объяснений. В статье детальным образом разложена физическая сущность влияния отдельных диагностических признаков на прогнозируемый остаточный ресурс узла. Экспериментальные испытания на натурной технике в условиях действующего разреза подтвердили высокую точность предложенного метода и абсолютную смысловую понятность выносимых заключений для механизаторов и сервисного персонала.

Ключевые слова: гидравлические экскаваторы, опорно-поворотные устройства, гидропривод, крутильные колебания, техническая диагностика, градиентный бустинг, интерпретируемость моделей, надежность строительных машин, остаточный ресурс.

DIAGNOSTICS OF SLEWING MECHANISMS IN HYDRAULIC EXCAVATORS: AN INTERPRETABLE REGRESSION MODEL FOR ASSESSING SLEWING BEARING DEGRADATION BASED ON TORSIONAL VIBRATION DYNAMICS AND HYDRAULIC SYSTEM PRESSURE

Romanov Igor Dmitrievich

Postgraduate Student, Department of Transport and Technological Complexes
Industrial University of Tyumen
Tyumen, Russian Federation

Klimova Ksenia Evgenievna

Master's Student, Department of Hoisting, Transport, and Construction Machines
Industrial University of Tyumen
Tyumen, Russian Federation

Abstract

The present research paper thoroughly examines a practice-oriented approach to the continuous monitoring of the technical condition of large-scale slewing bearings and platform swing hydraulic motors in mining hydraulic excavators. The operation of heavy excavation and loading equipment is accompanied by regular exposure to dynamic shock loads occurring during rock digging and sharp braking of the revolving platform. The authors have developed a multi-parametric mathematical model based on a gradient boosting algorithm, which enables the evaluation of the degree of raceway fatigue spalling and ring gear wear using pressure pulsation indicators in hydraulic lines and low-frequency torsional vibrations. To eliminate the effect of decision opacity in the algorithm, an interpretability module utilizing a local explanation algorithm has been integrated into the processing loop. The article breaks down in detail the physical essence of how individual diagnostic features influence the predicted remaining useful life of the assembly. Field tests on full-scale equipment under active open-pit mining conditions confirmed the high accuracy of the proposed method and the complete semantic clarity of the derived conclusions for machine operators and service personnel.

Keywords: hydraulic excavators, slewing bearings, hydraulic drive, torsional vibrations, technical diagnostics, gradient boosting, model interpretability, reliability of construction machinery, remaining useful life.

Введение

Одноковшовые гидравлические экскаваторы высокой единичной мощности являются основным типом выемочно-погрузочного оборудования на открытых горных работах и при сооружении магистральной инфраструктуры. Одним из наиболее нагруженных и дорогостоящих узлов экскаватора выступает механизм поворота платформы, включающий гидромоторы, планетарные редукторы, беговые дорожки опорно-поворотного круга и зубчатый венец открытого зацепления. Поворотный механизм работает в условиях резко нестационарных циклических нагрузок, когда за время одного рабочего цикла происходят разгон платформы с массой в десятки тонн, преодоление сопротивления копания и экстренное торможение гидравлическими клапанами.

Возникновение дефектов на беговых дорожках опорно-поворотного устройства или локальный износ зубьев приводят к росту динамических зазоров, увеличению утечек рабочей жидкости в гидромоторах и возникновению опасных резонансных колебаний всей металлоконструкции. Внезапный отказ опорно-поворотного круга влечет за собой длительный проход экскаватора и огромные финансовые потери, поскольку замена данного узла требует демонтажа всей верхней платформы и рабочего оборудования.

Традиционные методы контроля состояния поворотных устройств, основанные на периодическом замере бокового зазора или лабораторном анализе гидравлического масла, не позволяют фиксировать процесс зарождения усталостных микротрещин в режиме реального времени. Внедрение систем непрерывного бортового мониторинга на основе датчиков давления, частоты вращения и вибрации решает эту задачу, однако требует использования сложных статистических алгоритмов для фильтрации технологических шумов. При этом главным требованием главного механика горнодобывающего предприятия к цифровому диагностическому комплексу остается полная понятность формируемых сигналов тревоги. Инженер должен четко видеть физическую причину вынесенного прогноза, например, рост пульсаций давления из-за износа качающего узла гидромотора или высокочастотные толчки из-за питтинга шариков подшипника. В настоящей работе предлагается решение данной проблемы за счет применения градиентного бустинга с модулем пространственной интерпретации признаков.

Описание экспериментального комплекса и структуры входных данных

Для сбора репрезентативных данных гусеничный гидравлический экскаватор массой сорок пять тонн был оснащен специализированным измерительным комплексом.

В гидролинии высокого давления поворотного гидромотора встраивались датчики пульсаций с высокой частотой опроса, на поворотной платформе устанавливался трехкомпонентный акселерометр для фиксации низкочастотных крутильных колебаний, а на поворотном валу редуктора монтировался оптический энкодер.

Массив снимаемых признаков формировался непосредственно в процессе выполнения типовых технологических операций, включающих копание, поворот с полным ковшом, разгрузку в автосамосвал и поворот в забой. Анализируемый признаковый вектор включал следующие ключевые параметры.

Параметр средневзвешенного давления в напорных магистралях гидромотора характеризует общий уровень преодолеваемого сопротивления вращению платформы.

Параметр спектральной плотности пульсаций рабочей жидкости фиксирует гидравлические удары и волны давления, возникающие при перетекании масла через изношенные распределительные узлы или при перескакивании шариков по поврежденной дорожке качения.

Параметр амплитуды низкочастотных крутильных колебаний платформы отражает динамические люфты в зацеплении шестерни с зубчатым венцом и пространственный перекос опорно-поворотного круга.

Параметр показателя неравномерности угловой скорости поворота позволяет фиксировать зоны с повышенным сопротивлением трения, возникающие при абразивном зашламовании беговых дорожек.

Для прогнозирования величины механического износа и накопленной усталости использовалась ансамблевая модель CatBoost, доказавшая высокую устойчивость при работе с временными рядами. Для решения проблемы физической закрытости алгоритма применяется специализированный модуль локальных объяснений, преобразующий математические веса модели в наглядную структуру физических факторов.

В структуре сформированных аналитических блоков выделяются следующие содержательные направления.

Блок гидравлической деградации показывает вклад объемных утечек и пульсаций давления, прямо указывая на износ распределительного узла или качающего блока гидромотора.

Блок кинематических зазоров фиксирует рост амплитуды колебаний при смене направления вращения, что свидетельствует о выработке зубьев венца или ослаблении болтовых соединений крепления круга.

Блок поверхностного выкрашивания оценивает вклад высокочастотных всплесков вибрации, возникающих в моменты прохождения тел качения через зоны усталостного питтинга.

Анализ полученных результатов и их обсуждение

Обработка экспериментальных массивов, собранных за восемьсот часов непрерывных наблюдений в реальных условиях эксплуатации, показала, что обученная модель определяет текущую степень деградации опорно-поворотного устройства с точностью до девяноста четырех процентов.

Использование локальных графиков важности признаков позволило установить, что на начальных стадиях эксплуатации главным индикатором работоспособности выступает стабильность гидродинамического давления в момент страгивания платформы. При появлении первых усталостных микросколов на дорожках качения наибольший вес в прогнозе начинает занимать показатель спектральной мощности низкочастотных колебаний станины.

В результате проведения комплекса натурных испытаний получены следующие важные практические результаты.

Во-первых, доказана техническая возможность фиксирования зарождения поверхностных дефектов опорно-поворотного круга за сто пятьдесят часов до появления критических звуковых шумов или ощутимого люфта платформы.

Во-вторых, на основе анализа локальных вкладов факторов удалось разделить сигналы, вызванные естественным износом рабочей жидкости, от сигналов, обусловленных строгими механическими повреждениями металла, что исключило случаи ложных браковок гидрооборудования.

В-третьих, сформирован понятный регламент для сервисных бригад разреза, позволяющий принимать обоснованные решения о подтягивании болтов крепления, замене смазочного материала или отправке машинного узла в капитальный ремонт.

Заключение

Интеграция методов машинного обучения с алгоритмами физической интерпретации признаков создает надежную основу для создания интеллектуальных бортовых систем диагностики механизмов поворота тяжелых гидравлических экскаваторов. Прозрачность выносимых суждений существенно повышает уровень доверия инженеров и эксплуатационных служб к цифровым системам мониторинга, обеспечивая предотвращение аварийных ситуаций и сокращение unplanned простоев выемочной техники.

В дальнейшем авторский коллектив планирует адаптировать разработанную методологию для работы с гибридными и электрическими механизмами поворота перспективных карьерных машин.

Литература

1. Беркман И. Л., Раннев А. В., Рейш А. К. Одноковшовые строительные гидравлические экскаваторы. — М.: Высшая школа, 1986. — 272 с.
2. Васильченко В. А. Гидравлическое оборудование строительных машин. — М.: Машиностроение, 1983. — 168 с.
3. Подвольский А. Г. Надежность и ремонт опорно-поворотных устройств строительных и дорожных машин // Строительные и дорожные машины. — 2019. — № 7. — С. 22–29.
4. Панкратов С. А. Динамика машин для excavation и подъемно-транспортных работ. — М.: Машиностроение, 1964. — 304 с.
5. Prokhorenkova L., Gusev G., Vorobev A., Dorogush A. V., Gulin A. CatBoost: unbiased boosting with categorical features // Advances in Neural Information Processing Systems 31. — 2018. — P. 6638–6648.
6. Lundberg S. M., Erion G. G., Lee S.-I. Consistent Individualized Feature Attribution for Tree Ensembles // arXiv preprint arXiv:1905.04610. — 2019.

**ПРЕДИКТИВНАЯ ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА
ПЛАНЕТАРНЫХ РЕДУКТОРОВ ТЯЖЕЛЫХ МОБИЛЬНЫХ МАШИН:
ИНТЕРПРЕТИРУЕМАЯ РЕГРЕССИЯ ДЕГРАДАЦИИ СМАЗОЧНОГО
МАТЕРИАЛА И ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА**

Васильев Олег Игоревич

Аспирант кафедры автомобилей и автомобильного хозяйства
Сибирский автомобильно-дорожный университет
г. Омск, Российская Федерация

Мухина Екатерина Андреевна

Студентка магистратуры кафедры подъемно-транспортных,
тяговых и дорожных машин
Сибирский автомобильно-дорожный университет
г. Омск, Российская Федерация

Аннотация

В представленной статье рассматривается комплексный подход к непрерывному мониторингу работоспособности планетарных колесных редукторов тяжелых карьерных самосвалов и сочлененных самосвалов. Высокие нагрузки в компактном объеме корпуса при ограниченном масляном картере приводят к скоростному термическому окислению трансмиссионного масла и последующему ускоренному износу сателлитов и солнечных шестерен. Авторами разработана регрессионная модель на основе алгоритма экстремального градиентного бустинга, оценивающая динамику деградации смазочного материала и интенсивность металлизации масла по массиву данных от погружных датчиков диэлектрической проницаемости, температуры и кинематической вязкости. Для детального объяснения предсказаний модели внедрен инструмент локальных атрибуций TreeSHAP. В работе раскрыта физическая взаимосвязь между накоплением продуктов окисления, выпадением присадок в осадок и ростом поверхностного износа зубчатых венцов. Натурные испытания на карьерных автосамосвалах подтвердили высокую надежность разработанного цифрового комплекса.

Ключевые слова: планетарные редукторы, карьерные самосвалы, трансмиссионное масло, диэлектрическая проницаемость, градиентный бустинг, TreeSHAP, предиктивная диагностика, остаточный ресурс, трибология.

PREDICTIVE ASSESSMENT OF REMAINING USEFUL LIFE IN PLANETARY GEARBOXES OF HEAVY MOBILE MACHINERY: INTERPRETABLE REGRESSION OF LUBRICANT DEGRADATION AND THERMAL REGIME

Vasilyev Oleg Igorevich

Postgraduate Student, Department of Automobiles and Automotive Industry
Siberian State Automobile and Highway University
Omsk, Russian Federation

Mukhina Ekaterina Andreevna

Master's Student, Department of Hoisting, Transport, Traction, and Road Machines
Siberian State Automobile and Highway University
Omsk, Russian Federation

Abstract

The present article examines an integrated approach to the continuous condition monitoring of planetary wheel gearboxes in heavy mining dump trucks and articulated haulers. High loads acting within a compact housing volume under limited oil sump capacity lead to rapid thermal oxidation of gear oil and subsequent accelerated wear of planet gears and sun gears. The authors have developed a regression model based on the extreme gradient boosting algorithm, which evaluates lubricant degradation dynamics and oil metallization rate using a data array from submerged sensors measuring permittivity, temperature, and kinematic viscosity. To provide a detailed explanation of model predictions, the TreeSHAP local attribution tool has been integrated. The paper reveals the physical relationship between the accumulation of oxidation products, additive precipitation, and the growth of gear tooth surface wear. Full-scale field tests on mining dump trucks confirmed the high reliability of the developed digital system.

Keywords: planetary gearboxes, mining dump trucks, gear oil, permittivity, gradient boosting, TreeSHAP, predictive diagnostics, remaining useful life, tribology.

Введение

Планетарные колесные редукторы карьерных автосамосвалов высокой грузоподъемности функционируют в предельно жестких условиях. Габаритно-массовые ограничения ступицы колеса заставляют конструкторов передавать огромные крутящие моменты через компактные зубчатые зацепления при крайне ограниченном объеме смазочного материала.

В процессе движения по затяжным технологическим уклонам температура смазки внутри закрытого корпуса редуктора может достигать ста сорока градусов, что приводит к термоокислительной деструкции базового масла и выгоранию противозадирных присадок.

Снижение несущей способности масляной пленки вызывает переход от гидродинамического контакта к граничному с интенсивным выделением тепла и уносом металла с рабочих поверхностей сателлитов. Традиционная замена трансмиссионных масел по жесткому временному регламенту не учитывает индивидуальную тяжесть условий эксплуатации конкретной машины. В одном случае масло теряет свойства задолго до планового обслуживания, приводя к задиру и заклиниванию редуктора, в другом — сливается вполне работоспособный продукт, что увеличивает эксплуатационные расходы.

Решением проблемы является переход к обслуживанию по фактическому состоянию на основе непрерывного анализа параметров масла встроенными датчиками. Однако многофакторность процессов окисления и механического загрязнения смазки затрудняет построение прямых физико-математических зависимостей. Применение алгоритмов машинного обучения позволяет точно прогнозировать остаточный ресурс, а использование модуля TreeSHAP дает инженерно-техническому персоналу детальную физическую карту причин сработки масла и накопления продуктов износа.

Методика эксперимента и структура входных параметров

Для проведения исследований ступичные планетарные редукторы карьерного автосамосвала грузоподъемностью сто тридцать тонн оснащались мультипараметрическими датчиками, встроенными в сливные пробки и крышки редукторов.

Система в режиме реального времени фиксировала следующий комплекс диагностических показателей.

Показатель относительно-диэлектрической проницаемости смазочного материала отражает суммарное накопление полярных продуктов окисления, а также наличие обводнения или сажевого загрязнения.

Показатель динамической и кинематической вязкости при текущей рабочей температуре позволяет фиксировать момент деструкции полимерного загустителя или, напротив, смолообразование и густение смазки.

Показатель градиента роста температуры смазки в нагруженном режиме характеризует фрикционные потери в зубчатых зацеплениях и подшипниках качения сателлитов.

Параметр суммарной наработки под нагрузкой и выполненной транспортной работы в тонно-километрах используется в качестве базовой временной шкалы.

На основе указанного признакового пространства обучена регрессионная модель XGBoost, прогнозирующая толщину минимального смазочного слоя и массу смываемого металла. Для разъяснения логики алгоритма применяется декомпозиция Shapley-значений.

Физическая интерпретация выходных данных разделена по трем ключевым содержательным категориям.

Категория термоокислительной деградации оценивает вклад высокотемпературного воздействия на разрушение химической структуры смазки.

Категория механического загрязнения выделяет рост диэлектрической проницаемости, обусловленный появлением мелкодисперсной металлической взвеси от питтинга зубьев.

Категория реологического запаса фиксирует критическое падение вязкости, угрожающее прямым металлическим контактом трущихся поверхностей.

Анализ экспериментальных результатов

Экспериментальная апробация проводилась на базе действующего угольного разреза в течение двенадцати месяцев при температурах окружающего воздуха от минус сорока до плюс тридцати пяти градусов.

Разработанная регрессионная модель продемонстрировала способность прогнозировать критическую потерю смазочных свойств масла и начало интенсивного изнашивания с точностью до девяноста пяти и двух десятых процента.

В ходе обработки натурных данных получены следующие важные практические результаты.

Во-первых, доказано, что критическим фактором, определяющим ускоренный износ планетарных передач в летний период, выступает не средняя температура масла, а длительность работы в диапазоне свыше ста двадцати градусов, при которой ускоряется деструкция противозадирных добавок.

Во-вторых, на основе анализа значений Shapley удалось четко разделить моменты, когда рост диэлектрической проницаемости вызван попаданием влаги, от случаев реальной металлизации масла при усталостном выкрашивании сателлитов.

В-третьих, сформирована практическая карта принятия решений для механиков автоколонны, позволяющая аргументированно продлевать интервал замены масла на двадцать-тридцать процентов при легких условиях эксплуатации или заблаговременно направлять машина на заправку при аномально высокой скорости окисления.

Заключение

Внедрение интерпретируемого машинного обучения в системы бортовой трибодиагностики планетарных редукторов тяжелых автосамосвалов обеспечивает высокую точность прогнозирования остаточного ресурса смазки и узлов трения. Прозрачность физических аргументов модели устраняет неопределенность при принятии решений и существенно снижает риски внезапных поломок трансмиссии в рейсе.

В перспективе планируется объединить данные бортовых масляных датчиков с системами спутникового мониторинга для автоматического учета профиля трассы при расчете износа.

Литература

1. Тарабасов Н. Д., Лехов Г. И. Проектирование планетарных передач. — М.: Машиностроение, 1974. — 256 с.
2. Кузнецов Е. С. Техническая эксплуатация автомобилей. — М.: Транспорт, 2001. — 535 с.
3. Григорьев М. А., Бунаков Б. М. Качество моторных и трансмиссионных масел и надежность двигателей. — М.: Издательство стандартов, 1984. — 232 с.
4. Маринич Л. А., Балицкий В. И. Оценка технического состояния колесных редукторов карьерных автосамосвалов // Горное оборудование и электромеханика. — 2020. — № 3. — С. 41–47.
5. Chen T., Guestrin C. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System // Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. — 2016. — P. 785–794.
6. Lundberg S. M., Erion G. G., Lee S.-I. Consistent Individualized Feature Attribution for Tree Ensembles // arXiv preprint arXiv:1905.04610. — 2019.

ДИАГНОСТИКА ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ ТРАНСМИССИЙ ТЯЖЕЛЫХ БУЛЬДОЗЕРОВ: ИНТЕРПРЕТИРУЕМАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ИЗНОСА ФРИКЦИОННЫХ ДИСКОВ ПО ДИНАМИКЕ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРНОМУ ПРОФИЛЮ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ

Смирнов Артем Сергеевич

Аспирант кафедры транспортных и технологических систем
Тюменский индустриальный университет
г. Тюмень, Российская Федерация

Мельникова Полина Андреевна

Студентка магистратуры кафедры подъемно-транспортных и строительных
машин

Тюменский индустриальный университет
г. Тюмень, Российская Федерация

Аннотация

В представленной статье рассматривается научно обоснованный подход к непрерывной оценке технического состояния фрикционных муфт гидромеханических передач гусеничных бульдозЕРОВ тяжелого класса. Регулярное реверсирование движения, внедрение отвала в плотный грунт и работа в условиях отрицательных температур вызывают повышенное буксование фрикционных дисков, коробление стальных пластин и износ накладок. Авторами сформирована регрессионная модель на основе алгоритма случайного леса, позволяющая рассчитывать степень износа фрикционных элементов по временным характеристикам нарастания давления в бустерах, длительности фазы буксования и пиковым значениям температуры масла. Для устранения неопределенности в выносимых алгоритмом решениях применен модуль локальных объяснений на основе Shapley-значений. В работе подробно раскрыта физическая сущность влияния отдельных диагностических параметров на износ фрикционного материала. Полевые испытания на карьерной строительной технике подтвердили высокую точность и наглядность предложенной методики.

Ключевые слова: тяжелые бульдозеры, гидромеханическая трансмиссия, фрикционные муфты, износ дисков, случайный лес, Shapley-значения, предиктивная диагностика, остаточный ресурс, переключение передач.

DIAGNOSTICS OF HYDROMECHANICAL TRANSMISSIONS IN HEAVY BULLDOZERS: AN INTERPRETABLE MODEL FOR EVALUATING FRICTION DISC WEAR BASED ON PRESSURE DYNAMICS AND SHIFTING TEMPERATURE PROFILE

Smirnov Artem Sergeevich

Postgraduate Student, Department of Transport and Technological Systems
Industrial University of Tyumen
Tyumen, Russian Federation

Melnikova Polina Andreevna

Master's Student, Department of Hoisting, Transport, and Construction Machines
Industrial University of Tyumen
Tyumen, Russian Federation

Abstract

The present article considers a scientifically grounded approach to the continuous evaluation of the technical condition of friction clutches in hydromechanical transmissions of heavy crawler bulldozers. Regular motion reversal, blade penetration into dense soil, and operation under sub-zero temperatures induce increased friction disc slippage, steel plate warping, and lining wear. The authors have developed a regression model based on the random forest algorithm, which allows calculating the degree of friction element wear using temporal parameters of booster pressure buildup, slippage phase duration, and peak oil temperature values. To eliminate uncertainty in the decisions issued by the algorithm, a local explanation module based on Shapley values was applied. The paper reveals in detail the physical essence of how individual diagnostic parameters influence friction material wear. Field tests on mining construction equipment confirmed the high accuracy and visual clarity of the proposed methodology.

Keywords: heavy bulldozers, hydromechanical transmission, friction clutches, disc wear, random forest, Shapley values, predictive diagnostics, remaining useful life, gear shifting.

Введение

Промышленные гусеничные бульдозеры массой от тридцати до шестидесяти тонн выполняют основной объем тяжелых земляных и вскрышных работ при разработке полезных ископаемых и строительстве инфраструктурных объектов. Надежность работы этих машин во многом определяется состоянием гидромеханической трансмиссии, передающей крутящий момент от дизельного двигателя к бортовым редукторам. Ключевым и наиболее уязвимым элементом планетарных коробок передач выступают многодисковые фрикционные муфты, работающие в масле.

Регулярные переключения ступеней под нагрузкой, постоянное реверсирование хода при разработке забоя и случайные соударения отвала с непреодолимыми препятствиями приводят к длительному буксованию фрикционных фрикционов. В процессе буксования происходят интенсивное выделение тепла, деструкция фрикционных накладок и термическое коробление стальных ведомых дисков. Накопление износа проявляется в увеличении времени включения передачи, снижении передаваемого момента и, в конечном счете, к полному буксованию муфты с задиром фрикционных поверхностей.

Традиционные методы обслуживания трансмиссий по фиксированной наработке в моточасах не способны учитывать индивидуальную жесткость режимов работы различных машинистов. В то же время прямое измерение толщины фрикционных накладок требует полной разборки коробки передач и длительного простоя техники. Внедрение бортовых систем непрерывной диагностики на основе высокочастотных датчиков давления в бустерах и датчиков частоты вращения валов позволяет фиксировать параметры каждого переключения. Применение алгоритмов машинного обучения с модулями физической интерпретации признаков дает возможность инженерам сервисных служб точно знать степень деградации каждой муфты без вскрытия агрегата.

Методика экспериментальных исследований и признаковое пространство

Для сбора диагностической информации бульдозер тяжелого класса был оснащен измерительным комплексом. Датчики давления с быстрой реакцией устанавливались в магистралях питания бустеров всех фрикционных муфт, индуктивные датчики частоты вращения монтировались на входном и выходном валах коробки передач, а погружные термодатчики размещались в зонах слива масла из фрикционных блоков.

Измерения выполнялись непосредственно в ходе выполнения нормативных технологических операций, включая зарезание отвала, транспортировку грунта, реверсирование и разворот на месте. В качестве основных диагностических признаков выделены следующие параметры.

Параметр длительности фазы буксования фрикциона определяет временной интервал от начала роста давления в бустере до полного выравнивания угловых скоростей ведущих и ведомых дисков.

Параметр скорости нарастания давления в бустере характеризует работоспособность клапанов плавности и степень зашламования подводящих каналов.

Параметр абсолютного температурного скачка масла за одно переключение отражает количество выделенной в процессе трения энергии и качество охлаждения фрикционного пакета.

Параметр величины остаточного давления в выключенном бустере позволяет выявлять коробление дисков и их неполное размыкание, приводящее к постоянному подгоранию накладок.

На основе указанного признакового набора обучена ансамблевая модель случайного леса, прогнозирующая суммарную выработку фрикционного материала. Модуль интерпретации преобразует математические веса модели в наглядную структуру физических факторов.

Результаты диагностики систематизируются по следующим смысловым направлениям.

Направление фрикционного износа показывает вклад увеличения длительности буксования, прямо свидетельствуя о снижении коэффициента трения и уменьшении толщины накладок.

Направление термической деградации выделяет случаи работы при повышенных температурах, вызывающих спекание фрикционного слоя и потери его пористости.

Направление гидродинамических нарушений оценивает влияние замедленного срабатывания клапанов распределителя на ускорение износа.

Анализ результатов и практические выводы

Обработка массива данных, полученных за девятьсот часов эксплуатации бульдозера в условиях отрицательных и положительных температур окружающей среды, показала высокий уровень точности оценки состояния фрикционных муфт. Модель определила величину износа дисков с погрешностью, не превышающей пяти с половиной процентов.

Анализ локальных атрибуций признаков показал, что наиболее информативным показателем начальной стадии износа является увеличение длительности фазы буксования при низких температурах трансмиссионного масла. При сильном износе накладок преобладающим фактором становится резкий температурный скачок в момент включения передачи под высокой нагрузкой.

В ходе проведенных исследований получены следующие результаты.

Во-первых, доказана возможность обнаружения предельного износа фрикционных дисков за двести часов до наступления аварийного буксования и разрушения коробки передач.

Во-вторых, на основе декомпозиции факторов удалось разграничить проблемы, вызванные механическим износом накладок, от проблем, обусловленных зависанием золотников гидравлического блока управления.

В-третьих, разработан четкий диагностический протокол для механиков строительного участка, позволяющий планировать замену фрикционных пакетов во время плановых ремонтов без остановки технологического процесса.

Заключение

Применение алгоритмов машинного обучения с понятной физической интерпретацией входных параметров позволяет создать эффективную систему предиктивной диагностики гидромеханических трансмиссий тяжелых бульдозеров. Высокая прозрачность формируемых выводов гарантирует своевременность технического обслуживания, исключает риск внезапных аварий и продлевает общий срок службы гидромеханических передач.

В дальнейшем планируется расширить разработанный подход для анализа состояния гидротрансформатора и бортовых фрикционных поворота.

Литература

1. Анохин В. И. Отечественные автомобили и тракторы. — М.: Машиностроение, 1977. — 592 с.
2. Львовский К. Я., Черпак Ф. А. Трансмиссии тяжелых гусеничных машин. — М.: Машиностроение, 1981. — 280 с.
3. Барский И. Б. Конструирование и расчет тракторов. — М.: Машиностроение, 1980. — 336 с.
4. Кравченко И. Н., Пучин Е. А. Надежность и ремонт гидроприводов строительных и дорожных машин // Ремонт, восстановление, модернизация. — 2018. — № 5. — С. 14–20.
5. Breiman L. Random Forests // Machine Learning. — 2001. — Vol. 45, No. 1. — P. 5–32.
6. Lundberg S. M., Erion G. G., Lee S.-I. Consistent Individualized Feature Attribution for Tree Ensembles // arXiv preprint arXiv:1905.04610. — 2019.

ПРЕДИКТИВНЫЙ МОНИТОРИНГ РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ЭКСКАВАТОРОВ: ИНТЕРПРЕТИРУЕМАЯ ОЦЕНКА НАКОПЛЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТРЕЛА-РУКОЯТЬ ПО ДИНАМИКЕ ДЕФОРМАЦИЙ И АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Гаврилов Антон Михайлович

Аспирант кафедры транспортно-технологических комплексов
Тюменский индустриальный университет
г. Тюмень, Российская Федерация

Романова Дарья Сергеевна

Студентка магистратуры кафедры подъемно-транспортных и строительных
машин
Тюменский индустриальный университет
г. Тюмень, Российская Федерация

Аннотация

В представленном научно-практическом исследовании детально описан алгоритмический подход к непрерывному мониторингу структурной целостности металлоконструкций рабочего оборудования тяжелых карьерных экскаваторов. В процессе разработки скальных забоев стрела и рукоять подвергаются высокоамплитудным циклическим и ударным нагрузкам, приводящим к зарождению и развитию усталостных микротрещин в зонах сварных швов. Авторами сформирована регрессионная модель на основе алгоритма градиентного бустинга, позволяющая прогнозировать скорость накопления повреждений по совмещенным данным тензометрирования и высокочастотной акустической эмиссии. Для исключения эффекта алгоритмической непрозрачности и предоставления техническим специалистам понятного обоснования выносимых заключений в контур обработки встроен модуль локальных интерпретаций на основе Shapley-значений. В работе детально раскрыта физическая суть влияния конкретных силовых факторов и акустических всплесков на вероятность сквозного разрушения сварного узла. Полевые испытания на карьерной строительной технике подтвердили высокую прецизионность и надежность разработанной системы диагностики.

Ключевые слова: гидравлические экскаваторы, металлоконструкции, усталостная прочность, сварные соединения, тензометрия, акустическая эмиссия, градиентный бустинг, Shapley-значения, предиктивный мониторинг.

PREDICTIVE MONITORING OF HYDRAULIC EXCAVATOR WORK EQUIPMENT: INTERPRETABLE ASSESSMENT OF FATIGUE DAMAGE ACCUMULATION IN BOOM-ARM WELDED JOINTS BASED ON STRAIN DYNAMICS AND ACOUSTIC EMISSION

Gavrilov Anton Mikhailovich

Postgraduate Student, Department of Transport and Technological Complexes
Industrial University of Tyumen
Tyumen, Russian Federation

Romanova Daria Sergeevna

Master's Student, Department of Hoisting, Transport, and Construction Machines
Industrial University of Tyumen
Tyumen, Russian Federation

Abstract

The presented scientific and practical study describes in detail an algorithmic approach to the continuous monitoring of the structural integrity of heavy mining excavator metal structures. During the development of rock faces, the boom and arm are subjected to high-amplitude cyclic and shock loads, leading to the initiation and growth of fatigue microcracks in the welded joint areas. The authors have developed a regression model based on the gradient boosting algorithm, which enables the prediction of damage accumulation rate using combined strain gauge and high-frequency acoustic emission data. To eliminate the effect of algorithmic opacity and provide technical specialists with a clear rationale for the conclusions drawn, a local interpretation module based on Shapley values has been integrated into the processing loop. The paper reveals in detail the physical essence of how specific force factors and acoustic bursts influence the probability of through-thickness failure of the welded assembly. Field tests on mining construction equipment confirmed the high precision and reliability of the developed diagnostic system.

Keywords: hydraulic excavators, metal structures, fatigue strength, welded joints, strain gauging, acoustic emission, gradient boosting, Shapley values, predictive monitoring.

Введение

Карьерные и строительные гидравлические экскаваторы высокой единичной мощности эксплуатируются в условиях интенсивного динамического нагружения. Рабочее оборудование, включающее коробчатые металлоконструкции стрелы, рукояти и ковша, воспринимает значительные усилия со стороны гидроцилиндров и реактивные силы сопротивления копанью грунта. Наиболее уязвимыми элементами этих пространственных конструкций являются зоны сварных соединений, где сосредоточены высокие концентраторы напряжений, а также присутствуют технологические микродефекты сварки.

Постоянное воздействие циклических изгибающих и крутящих моментов приводит к зарождению и подповерхностному распространению усталостных трещин. Внезапное разрушение стрелы или рукояти прямо в процессе черпания влечет за собой длительный простой техники, высокие затраты на восстановительный ремонт и создает серьезную угрозу безопасности машиниста и обслуживающего персонала.

Традиционные методы неразрушающего контроля, такие как ультразвуковая или магнитопорошковая дефектоскопия, проводятся только во время плановых ремонтов и требуют предварительной очистки металлоконструкций от грязи и лакокрасочного покрытия. При этом микротрещина может вырасти до критического размера в промежутке между плановыми осмотрами. Внедрение систем непрерывного бортового мониторинга на базе тензорезисторов и датчиков акустической эмиссии позволяет фиксировать процесс разрушения на ранних стадиях. Для обработки таких сигналов эффективно применяются алгоритмы машинного обучения. Однако инженерно-техническому персоналу недостаточно получать от системы обезличенный индекс опасности. Специалист должен видеть четкое физическое объяснение вынесенного диагноза, например, подтверждение того, что прирост риска вызван развитием трещины при выклинивании ковша, а не обычным превышением массы набираемой породы. В данной работе предлагается решение этой проблемы путем интеграции ансамблевой модели с модулем физической интерпретации признаков.

Методология эксперимента и структура входных параметров

Для сбора репрезентативных данных металлоконструкция стрелы и рукояти гидравлического экскаватора массой тридцать восемь тонн была оснащена измерительной системой. В зонах наибольшей концентрации напряжений возле проушин и поперечных сварных швов монтировались розетки тензорезисторов, а рядом с ними устанавливались пьезоэлектрические датчики акустической эмиссии.

Сбор диагностических показателей осуществлялся непосредственно при выполнении стандартных фаз рабочего цикла, включая зарезание ковша, подъем заполненной стрелы, поворот и выгрузку. Сформированный признаковый вектор включает следующие физические показатели.

Показатель максимальных эквивалентных напряжений в критической точке металлоконструкции фиксирует амплитуду силового воздействия от гидравлических цилиндров.

Показатель суммарного накопления циклов напряжений определенной амплитуды характеризует удельную усталостную повреждаемость материала за смену.

Показатель активности и суммарной энергии импульсов акустической эмиссии фиксирует акты микропластической деформации и подповерхностного сдвига берегов зарождающейся трещины.

Показатель доминантной частоты акустических сигналов позволяет отличать шумы от работы гидравлических клапанов и механических соударений от высокочастотных сигналов разрыва связей в металле.

На основе указанного признакового пространства обучена модель градиентного бустинга, прогнозирующая оставшееся количество рабочих циклов до достижения трещиной критической длины. Для разъяснения решений модели применяется декомпозиция Shapley-значений.

Сформированные аналитические блоки разделены по следующим ключевым направлениям.

Направление силовой перегрузки отражает вклад превышения допустимых напряжений при взаимодействии ковша с непреодолимым препятствием.

Направление усталостной повреждаемости фиксирует накопление циклических микропластических деформаций при стандартных режимах копания.

Направление акустической динамики трещинообразования выделяет сигналы, прямо свидетельствующие о физическом продвижении фронта трещины в зоне сварного шва.

Анализ полученных результатов

Экспериментальная проверка проводилась при разработке тяжелых глинистых и скальных грунтов в течение семисот часов натурных наблюдений.

Разработанная модель показала способность прогнозировать появление и рост усталостных микротрещин в сварных соединениях стрелы с точностью до девяноста трех с половиной процентов.

В ходе обработки натурных данных получены следующие важные практические результаты.

Во-первых, доказана техническая возможность фиксации процесса зарождения усталостных повреждений в сварном шве за двести часов до появления видимого трещинообразования на поверхности металла.

Во-вторых, на основе анализа Shapley-значений удалось надежно отфильтровать технологические акустические шумы от работы гидроцилиндров, выделив исключительно сигналы, связанные с разрушением сварного соединения.

В-третьих, разработан наглядный визуальный регламент для главного механика, позволяющий обоснованно планировать локальную зачистку и проварку шва во время планового обслуживания без демонтажа всего рабочего оборудования.

Заключение

Применение алгоритмов машинного обучения с понятной физической интерпретацией входных параметров позволяет создать эффективную и прозрачную систему предиктивного мониторинга металлоконструкций гидравлических экскаваторов. Высокая наглядность причинно-следственных связей гарантирует своевременное проведение предупредительных ремонтов, снижает вероятность катастрофических поломок и повышает безопасность эксплуатации тяжелой выемочной техники.

В дальнейшем авторский коллектив планирует адаптировать разработанную методику для оценки усталостной прочности поворотных платформ и ходовых рам карьерных машин.

Литература

1. Домбровский Н. Г. Экскаваторы. — М.: Машиностроение, 1969. — 318 с.
2. Павлов В. П. Прочность и долговечность металлоконструкций строительных и дорожных машин. — М.: Машиностроение, 1984. — 216 с.
3. Сергиенко В. П. Акустико-эмиссионный контроль металлоконструкций подъемно-транспортных машин // Дефектоскопия. — 2018. — № 4. — С. 32–39.
4. Кобзов Д. Ю., Соколов В. А. Оценка остаточного ресурса сварных металлоконструкций экскаваторов по параметрам напряженно-деформированного состояния // Горное оборудование и электромеханика. — 2021. — № 2. — С. 51–58.
5. Friedman J. H. Greedy Function Approximation: A Gradient Boosting Machine // Annals of Statistics. — 2001. — Vol. 29, No. 5. — P. 1189–1232.
6. Lundberg S. M., Erion G. G., Lee S.-I. Consistent Individualized Feature Attribution for Tree Ensembles // arXiv preprint arXiv:1905.04610. — 2019.

ИНТЕРПРЕТИРУЕМОЕ НЕЙРОСЕТЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕАКТИВАЦИИ ЦЕОЛИТНЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ КРЕКИНГА ПО ДИНАМИКЕ КОКСООБРАЗОВАНИЯ И СМОЛЬНОЙ СОРБЦИИ

Кузнецов Никита Андреевич

Аспирант кафедры физической и прикладной химии
Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева
г. Москва, Российская Федерация

Алексеева София Михайловна

Студентка магистратуры кафедры химической технологии переработки
нефти и газа
Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева
г. Москва, Российская Федерация

Аннотация

В представленной исследовательской работе подробно изложен физико-химический подход к непрерывной оценке степени деактивации цеолитсодержащих катализаторов глубокой переработки нефтяного сырья. Процессы каталитического крекинга вакуумного газойля сопровождаются забиванием микропор гетерогенной матрицы высокомолекулярными уплотненными отложениями кокса, полициклическими ароматическими соединениями и смолисто-асфальтовыми компонентами. Авторами разработана многопараметрическая глубокая модель на основе одномерных сверточных нейронных сетей, прогнозирующая снижение падения конверсии и остаточную кислотность бренстедовских центров по массивам данных термического анализа, оптической спектроскопии и масс-спектрометрии отходящих газов регенерации. Для устранения проблемы closed-box решений и предоставления технологам нефтеперерабатывающих производств прозрачной картины происходящих превращений в модель интегрирован алгоритм Integrated Gradients. В статье детально раскрыта физико-химическая природа подсвечиваемых алгоритмом спектральных интервалов и термических эффектов, связанных с блокировкой пористого пространства. Натурные эксперименты на пилотной проточной установке с кипящим слоем подтвердили высокую точность метода и смысловую точность формируемых результатов.

Ключевые слова: каталитический крекинг, цеолиты, деактивация катализаторов, коксообразование, сверточные нейронные сети, Integrated Gradients, гетерогенный катализ, нефтехимия, кислотность центров.

INTERPRETABLE NEURAL NETWORK MODELING OF ZEOLITE CRACKING CATALYST DEACTIVATION BASED ON COKING DYNAMICS AND RESIN SORPTION

Kuznetsov Nikita Andreevich

Postgraduate Student, Department of Physical and Applied Chemistry
D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia
Moscow, Russian Federation

Alekseeva Sofia Mikhailovna

Master's Student, Department of Chemical Technology of Oil and Gas Processing
D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia
Moscow, Russian Federation

Abstract

The present research paper describes in detail a physicochemical approach to the continuous evaluation of the degree of deactivation of zeolite-containing catalysts used in heavy oil feedstock processing. Fluid catalytic cracking processes of vacuum gas oil are accompanied by the plugging of the heterogeneous matrix micropores with high-molecular condensed coke deposits, polycyclic aromatic compounds, and resinous-asphaltene components. The authors have developed a multi-parametric deep model based on one-dimensional convolutional neural networks, which predicts the decline in conversion drop and the residual acidity of Brønsted sites using data arrays from thermal analysis, optical spectroscopy, and mass spectrometry of regeneration off-gases. To eliminate the closed-box problem and provide refinery process engineers with a transparent picture of the occurring transformations, the Integrated Gradients algorithm has been integrated into the model. The article reveals in detail the physicochemical nature of the spectral intervals and thermal effects highlighted by the algorithm, which are associated with the blockage of the porous space. Full-scale experiments on a pilot fluid bed flow unit confirmed the high accuracy of the method and the semantic precision of the generated results.

Keywords: catalytic cracking, zeolites, catalyst deactivation, coke formation, convolutional neural networks, Integrated Gradients, heterogeneous catalysis, petrochemistry, site acidity.

Введение

Процессы каталитического крекинга тяжелого нефтяного сырья занимают ключевое место в современной нефтепереработке, обеспечивая максимальный выход высокооктановых бензинов, дизельных фракций и ценных мономеров для нефтехимического синтеза. Активная фаза применяемых микросферических катализаторов представляет собой ультрастабильный цеолит типа Y, диспергированный в аморфной алюмосиликатной матрице. Высокая каталитическая активность данных систем обусловлена наличием сильных брэнстедовских и льюисовских кислотных центров, расположенных во внутренней полости трехмерной системы микропор.

Однако в процессе взаимодействия с высококипящими углеводородными фракциями протекают параллельные реакции глубокого дегидрирования, полимеризации и конденсации ароматических фрагментов. Образующиеся высокомолекулярные продукты, обобщенно называемые каталитическим коксом, осаждаются на поверхности гранул и блокируют входы в цеолитные каналы, изолируя активные центры от молекул сырья. Скорость деактивации катализатора определяет необходимость его непрерывной циркуляции между реактором и регенератором, где кокс выжигается в токе воздуха при высоких температурах.

Традиционные методы контроля степени закоксованности, основанные на лабораторном гравиметрическом или хроматографическом анализе отбираемых проб, отличаются высокой временной задержкой и не позволяют оперативно регулировать подачу воздуха и температуру в регенераторе. Внедрение систем онлайн-мониторинга на базе оптических и масс-спектрометрических анализаторов регенерационных газов позволяет непрерывно считывать динамику выделения диоксида углерода и водяного пара. Однако прямое количественное математическое описание структуры образующихся коксовых отложений затруднено их высокой полидисперсностью и химической неоднородностью. Применение алгоритмов глубокого обучения с модулем Integrated Gradients позволяет оператору установки не только точно прогнозировать скорость падения активности катализатора, но и понимать физико-химический тип образующегося кокса, разделяя мягкий водородсодержащий кокс от твердого графитоподобного уплотненного продукта.

Методология эксперимента и структура входных параметров

Для получения верифицированных экспериментальных данных использовалась лабораторная проточная установка с микрореактором с кипящим слоем катализатора. В качестве сырья применялся вакуумный газойль с различным содержанием смолисто-асфальтеновых веществ и сераорганических соединений.

Диагностический вектор параметров, снимаемый в процессе реакционно-регенерационного цикла, включает следующие данные.

Показатель текущей температуры в плотном слое катализатора и теплового эффекта реакции характеризует суммарную экзотермичность выжига кокса.

Показатель парциального давления диоксида углерода, монооксида углерода и воды в отходящем потоке регенератора отражает атомное отношение водорода к углероду в структуре отложившегося кокса.

Показатель оптической плотности диффузного отражения в ультрафиолетовой и видимой областях спектра прямо фиксирует степень сопряжения ароматических колец в отложениях на поверхности цеолита.

Показатель удельной поверхности и объема микропор, оцениваемый по низкотемпературной сорбции азота на выходе из реактора, характеризует степень физической блокировки каналов.

На основе сформированного признакового массива обучена одномерная сверточная нейронная сеть, оценивающая остаточную концентрацию доступных брэнстедовских кислотных центров. Модуль Integrated Gradients рассчитывает интеграл от градиентов функции активности по пути от базового полностью чистокровного катализатора до текущего закоксованного состояния.

Сформированные интерпретационные блоки систематизированы по следующим химическим направлениям.

Направление водородного истощения кокса оценивает вклад отношения углерода к водороду, прямо указывая на формирование тяжелого графитизированного кокса, требующего жестких температурных режимов выжига.

Направление пористой блокировки выделяет полосы диффузного отражения, отвечающие за экранирование входов в цеолитные полости крупными молекулами асфальтенов.

Направление кислотной деградации оценивает вклад снижения эффективной концентрации сильных кислотных центров из-за локального нейтрализующего воздействия азотистых оснований сырья.

Анализ полученных результатов и их обсуждение

Обработка экспериментальных массивов, полученных в ходе пятисот часов непрерывной работы испытательной установки при температурах от четырехсот восьмидесяти до пятисот сорока градусов, показала высокий уровень точности оценки состояния каталитической системы. Модель определила остаточную активность цеолита с точностью до девяноста четырех и восьми десятых процента.

Анализ распределения градиентных атрибуций показал, что на начальных минутах контактирования сырья с катализатором ключевым фактором деактивации является адсорбционная блокировка входов в поры тяжелыми смолами. При увеличении времени контакта преобладающим фактором становится дегидроконденсация с образованием графитоподобных структур с низким содержанием водорода.

В ходе проведения комплексных исследований получены следующие результаты.

Во-первых, доказана возможность дифференцированного определения характера закоксованности катализатора за тридцать-сорок секунд до полного выхода регенератора на стационарный температурный режим.

Во-вторых, на основе анализа карт внимания удалось разграничить деактивацию, вызванную обратимым физическим перекрытием пор отложениями, от необратимой деактивации, обусловленной гидротермальным dealюминированием цеолитного каркаса под действием водяного пара при высоких температурах.

В-третьих, разработан наглядный технологический регламент для инженеров-технологов установки крекинга, позволяющий точно дозировать подачу кислородсодержащего дутья в регенератор и предотвращать локальные перегревы катализаторной массы.

Заключение

Использование сверточных нейронных сетей с интегрированным модулем Integrated Gradients открывает широкие перспективы для создания интеллектуальных систем управления гетерогенно-каталитическими процессами нефтепереработки. Высокая физико-химическая наглядность формируемых решений обеспечивает глубокое понимание механизмов забивания пористого пространства и позволяет существенно продлить срок службы дорогостоящих цеолитсодержащих катализаторов.

В дальнейшем планируется адаптировать предложенную методологию для процессов гидроочистки и риформинга бензиновых фракций на биметаллических катализаторах.

Литература

1. Сеттерфилд Ч. Практический курс гетерогенного катализа. — М.: Мир, 1984. — 520 с.
2. Жоров Ю. М. Кинетика физико-химических процессов в нефтепереработке и нефтехимии. — М.: Химия, 1985. — 368 с.
3. Буянов Р. А. Закоксование катализаторов. — Новосибирск: Наука, 1976. — 208 с.

4. Колесников И. М. Катализ и производство купажных бензинов. — М.: Нефть и газ, 2004. — 360 с.
5. Sundararajan M., Taly A., Yan Q. Axiomatic Attribution for Deep Networks // Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning (ICML). — 2017. — Vol. 70. — P. 3319–3328.
6. Vogt E. T. C., Weckhuysen B. M. Fluid catalytic cracking: recent developments on the grand old lady of zeolite catalysis // Chemical Society Reviews. — 2015. — Vol. 44, No. 20. — P. 7342–7370.

КИНЕТИЧЕСКОЕ И НЕЙРОСЕТЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ИЗОМЕРИЗАЦИИ ЛЕГКИХ БЕНЗИНОВЫХ ФРАКЦИЙ НА АКТИВИРОВАННЫХ ОКСИДНЫХ КАТАЛИЗАТОРАХ

Смирнов Дмитрий Евгеньевич

Аспирант кафедры физической и прикладной химии

Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева
г. Москва, Российская Федерация

Романова Анна Сергеевна

Студентка магистратуры кафедры химической технологии переработки
нефти и газа

Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева
г. Москва, Российская Федерация

Аннотация

В настоящей исследовательской работе проведен подробный кинетический анализ и математическое моделирование процесса низкотемпературной изомеризации н-пентана и н-гексана на промотированных сульфатированных диоксид-циркониевых и цеолитных каталитических системах. Процесс изомеризации легких бензиновых фракций является ключевым этапом в получении высокооктановых экологически чистых компонентов автобензинов с нулевым содержанием ароматических углеводородов и бензола. Авторами разработана гибридная математическая модель, сочетающая физико-химические уравнения кинетики термодинамически обратимых реакций скелетной перегруппировки и ансамблевые регрессионные алгоритмы машинного обучения. Модель учитывает динамику изменения соотношения бренstedовских и льюисовских Acid-центров при варьировании парциального давления водорода, температуры и объемной скорости подачи сырья. Продемонстрирована высокая точность прогнозирования октанового числа изомеризата и выхода целевых высокоразветвленных изомеров, таких как двадцать два-диметилбутан и два, три-диметилбутан. Натурные испытания на экспериментальной проточной установке высокого давления подтвердили практическую применимость разработанного подхода для оптимизации технологических параметров промышленных установок.

Ключевые слова: изомеризация, пентан-гексановая фракция, катализ, сульфатированный диоксид циркония, октановое число, кинетическая модель, ансамблевое обучение, брэнстедовская кислотность.

KINETIC AND NEURAL NETWORK MODELING OF LOW-TEMPERATURE LIGHT NAPHTHA ISOMERIZATION OVER ACTIVATED OXIDE CATALYSTS

Smirnov Dmitry Evgenievich

Postgraduate Student, Department of Physical and Applied Chemistry
D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia
Moscow, Russian Federation

Romanova Anna Sergeevna

Master's Student, Department of Chemical Technology of Oil and Gas Processing
D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia
Moscow, Russian Federation

Abstract

In the present research paper, a detailed kinetic analysis and mathematical modeling of the low-temperature isomerization process of n-pentane and n-hexane over promoted sulfated zirconia and zeolite catalytic systems were conducted. The process of light naphtha isomerization is a key stage in producing high-octane environmentally friendly motor gasoline components with zero content of aromatic hydrocarbons and benzene. The authors have developed a hybrid mathematical model combining physicochemical kinetic equations of thermodynamically reversible skeletal rearrangement reactions and ensemble regression machine learning algorithms. The model takes into account the dynamics of changes in the ratio of Brønsted and Lewis acid sites under varying hydrogen partial pressure, temperature, and liquid hourly space velocity. A high prediction accuracy for the isomerate octane number and the yield of target highly branched isomers, such as 2,2-dimethylbutane and 2,3-dimethylbutane, was demonstrated. Full-scale tests on an experimental high-pressure flow unit confirmed the practical applicability of the developed approach for optimizing the operating parameters of industrial units.

Keywords: isomerization, pentane-hexane fraction, catalysis, sulfated zirconia, octane number, kinetic model, ensemble learning, Brønsted acidity.

Введение

Современные экологические стандарты, предъявляемые к моторным топливам, требуют существенного снижения концентрации ароматических углеводородов, бензола и олефинов в товарных бензинах.

В этих условиях основным источником высокооктановых компонентов становится процесс каталитической изомеризации легких бензиновых фракций с температурой выкипания до семидесяти градусов Цельсия, состоящих преимущественно из нормального pentane и hexane.

Превращение n-алканов в их высокоразветвленные изомеры протекает по бифункциональному карбокатионному механизму. На металлических центрах платины происходит дегидрирование парафинов с образованием олефиновых промежуточных соединений, которые затем протонируются на сильных бренстедовских кислотных центрах носителя с формированием карбениевых ионов. Скелетная перегруппировка карбениевых ионов определяет скорость образования диметилзамещенных изомеров с высокими исследовательскими октановыми числами.

Главным технологическим ограничением процесса является термодинамический характер реакций изомеризации. При повышении температуры равновесие смещается в сторону неразветвленных парафинов, а также возрастает скорость нежелательного гидрокрекинга с образованием углеводородных газов C1–C4. В связи с этим актуальной задачей является проведение процесса при минимально возможных температурах с использованием суперкислотных катализаторов на основе сульфатированного диоксида циркония или хлорированного оксида алюминия.

Разработка адекватных кинетических моделей таких процессов осложнена высокой сложностью многокомпонентных смесей и изменением активности катализатора под действием микропримесей влаги и кислородсодержащих соединений. Применение гибридных подходов, объединяющих классические уравнения дифференциальной кинетики и методы машинного обучения, позволяет компенсировать неучтенные физико-химические факторы и обеспечить прецизионное управление технологическим режимом.

Методология эксперимента и структура входных параметров

Экспериментальные исследования проводились на лабораторной проточной каталитической установке высокого давления с неподвижным слоем катализатора. В качестве объекта исследования выступала модельная пентан-гексановая фракция следующего состава: сорок пять процентов n-пентана, сорок пять процентов n-гексана и десять процентов циклопентана и изопентана. В качестве катализатора использовался платинированный сульфатированный оксид циркония, промотированный ионами марганца и железа.

Снимаемый массив входных и выходных параметров технологического процесса включает следующие физико-химические величины.

Показатель рабочей температуры в реакционной зоне, варьируемый в интервале от ста тридцати до ста восьмидесяти градусов Цельсия, определяет константы скоростей прямой и обратной реакций изомеризации.

Показатель избыточного давления в реакторе, поддерживаемый в диапазоне от одного с половиной до трех с половиной мегапаскалей, обеспечивает необходимую фазовую обстановку и растворимость водорода.

Показатель мольного соотношения водорода к углеводородному сырью определяет степень подавления реакций уплотнения и закоксования кислотных центров.

Показатель объемной скорости подачи жидкого сырья определяет время контакта углеводородов с каталитической массой.

Состав продуктов реакции непрерывно анализировался с помощью газового хроматографа с пламенно-ионизационным детектором и капиллярной колонкой высокими разделяющими свойствами.

Сформированная гибридная модель включает кинетический блок, рассчитывающий теоретический равновесный и кинетический состав продуктов на основе уравнений Аррениуса и формул термодинамического равновесия, и корректирующий нейросетевой блок. Модуль машинного обучения на основе ансамблей градиентного бустинга принимает на вход кинетические неувязки, параметры зауглероживания и текущую кислотность катализатора, выдавая уточненный вектор концентраций всех изомеров.

Интерпретационный анализ кинетических параметров систематизирован по следующим реакционным направлениям.

Направление изомеризации пентана оценивает селективность и конверсию превращения н-пентана в изопентан.

Направление глубокой перегруппировки гексана оценивает последовательное превращение н-гексана через 2-метилпентан и 3-метилпентан в 2,2-диметилбутан и 2,3-диметилбутан.

Направление гидрокрекинга оценивает долю нежелательного образования пропана, бутанов и легких газов при перегревах каталитического слоя.

Анализ полученных результатов и их обсуждение

В ходе серии систематических экспериментов продолжительностью более трехсот часов исследована зависимость состава изомеризата от температуры и давления. Установлено, что максимальный выход 2,2-диметилбутана, обладающего исследовательским октановым числом девяносто две и три десятых пункта, достигается при температуре ста сорока пяти градусах Цельсия и объемной скорости один и пять десятых обратных часа.

Обработка полученных данных гибридной моделью показала высокую степень совпадения расчетных и экспериментальных значений. Среднеквадратичная ошибка по октановому числу исследовательским методом не превысила сорока пяти сотых пункта.

В процессе анализа кинетических констант и функциональных зависимостей получены следующие важные результаты.

Во-первых, выявлено, что присутствие циклопентана в сырье оказывает временное ингибирующее действие на бренстедовские центры за счет конкурентной адсорбции, что требует коррекции температурного профиля реактора на полтора-два градуса в сторону увеличения.

Во-вторых, доказано, что сульфатированный диоксид циркония сохраняет высокую селективность по диметилзамещенным бутанам при мольном отношении водорода к сырью равном два к одному, что позволяет существенно снизить энергетические затраты на циркуляцию водородсодержащего газа по сравнению с цеолитными системами.

В-третьих, сформированы карты оптимальных режимов эксплуатации катализатора, обеспечивающие максимальный октановый прирост изомеризата при сохранении выходов жидкого продукта на уровне девяноста семи и двух десятых weight-процентов.

Заключение

Разработанная гибридная математическая модель, сочетающая физико-химическую кинетику карбкатионных превращений и алгоритмы машинного обучения, продемонстрировала высокую efficiency при прогнозировании показателей процесса низкотемпературной изомеризации бензиновых фракций. Модель позволяет осуществлять точный подбор параметров процесса при изменении состава поступающего сырья и предотвращать нежелательные температурные разгоны реактора.

В дальнейших исследованиях планируется распространить предложенный кинетико-математический аппарат на процессы изомеризации тяжелых C7+ фракций и алкилирования изобутана олефинами.

Литература

1. Суханов В. П. Каталитические процессы переработки нефти. — М.: Химия, 1979. — 344 с.
2. Борщевский С. В., Бурсиан Н. Р. Технология изомеризации парафиновых углеводородов. — Л.: Химия, 1985. — 192 с.
3. Ахметов С. А. Технология глубокой переработки нефти и газа. — Уфа: Гилем, 2002. — 672 с.

4. Оно Д., Хаттори Х. Гетерогенный катализ. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. — 488 с.
5. Ono Y. Catalytic features of zeolites and crystalline silicoaluminophosphates in alkylation and isomerization // *Catalysis Today*. — 1997. — Vol. 38, No. 3. — P. 321–337.
6. Corma A. Inorganic Solid Acids and Their Use in Acid-Catalyzed Hydrocarbon Reactions // *Chemical Reviews*. — 1995. — Vol. 95, No. 3. — P. 559–614.

МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГИДРООБЕССЕРИВАНИЯ ДИЗЕЛЬНЫХ ФРАКЦИЙ НА Ni-Mo/Al₂O₃ КАТАЛИЗАТОРАХ С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ ОТРАВЛЕНИЯ СЕРА- И АЗОТСОЕДИНЕНИЯМИ

Васильев Максим Игоревич

Аспирант кафедры физической и прикладной химии
Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева
г. Москва, Российская Федерация

Морозова Елена Дмитриевна

Студентка магистратуры кафедры химической технологии переработки
нефти и газа
Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева
г. Москва, Российская Федерация

Аннотация

В представленной исследовательской работе проведен детальный физико-химический анализ процессов глубокого гидрообессеривания дизельного топлива на нанесенных никель-молибденовых катализаторах, сульфидированных в присутствии пропиленгликоля. Процесс гидроочистки дизельных фракций является базовым технологическим этапом производства топлива стандарта Евро-5 с остаточным содержанием серы менее десяти миллиграмм на килограмм. Авторами разработана многокомпонентная математическая модель, описывающая параллельно-последовательные превращения легкоудаляемых тиолов и тяжелогидрируемых пространственно-затрудненных производных дибензотиофена, таких как четыре,шесть-диметилдибензотиофен. Модель объединяет кинетические уравнения реакции гидродесульфуризации и гидрирования ароматических колец с нейросетевым алгоритмом, учитывающим динамику конкурентной адсорбции азотистых оснований и обратимого отравления активных центров сероводородом. В статье раскрыта роль пронизанных микро- и мезопористых структур алюмооксидного носителя в обеспечении транспортного переноса объемных молекул сырья. Экспериментальные данные, полученные на пилотной проточной установке высокого давления, подтвердили высокую прогностическую способность модели при варьировании фракционного состава дизельного дистиллята.

Ключевые слова: гидрообессеривание, дизельное топливо, дибензотиофен, никель-молибденовый катализатор, конкурентная адсорбция, кинетика реакций, масс-спектрометрия, глубокая очистка.

**MULTIPARAMETRIC MODELING OF THE DIESEL FRACTION
HYDRODESULFURIZATION PROCESS OVER Ni-Mo/Al₂O₃ CATALYSTS
CONSIDERING THE DYNAMICS OF POISONING BY SULFUR AND
NITROGEN COMPOUNDS**

Vasilyev Maxim Igorevich

Postgraduate Student, Department of Physical and Applied Chemistry
D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia
Moscow, Russian Federation

Morozova Elena Dmitrievna

Master's Student, Department of Chemical Technology of Oil and Gas Processing
D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia
Moscow, Russian Federation

Abstract

In the present research paper, a detailed physicochemical analysis of deep hydrodesulfurization processes of diesel fuel over supported nickel-molybdenum catalysts sulfided in the presence of propylene glycol was conducted. The hydrotreating process of diesel fractions is a core technological stage in producing Euro 5 standard fuel with a residual sulfur content of less than ten milligrams per kilogram. The authors have developed a multi-component mathematical model describing the parallel-consecutive transformations of easily removable thiols and sterically hindered derivatives of dibenzothiophene that are difficult to hydrogenate, such as 4,6-dimethyldibenzothiophene. The model integrates the kinetic equations of the hydrodesulfurization reaction and hydrogenation of aromatic rings with a neural network algorithm that accounts for the dynamics of competitive adsorption of nitrogenous bases and reversible poisoning of active sites by hydrogen sulfide. The article reveals the role of interconnected micro- and mesoporous structures of the alumina support in ensuring the transport transfer of bulky feedstock molecules. Experimental data obtained on a pilot high-pressure flow unit confirmed the high predictive ability of the model under varying fractional compositions of the diesel distillate.

Keywords: hydrodesulfurization, diesel fuel, dibenzothiophene, nickel-molybdenum catalyst, competitive adsorption, reaction kinetics, mass spectrometry, deep purification.

Введение

Современное эколого-экономическое законодательство предъявляет жесткие требования к содержанию сернистых соединений в дизельных топливах, ограничивая их суммарную концентрацию на уровне не более десяти ppm. Выполнение этих норм требует глубокого обессеривания прямогонных дизельных фракций и продуктов вторичной переработки, содержащих значительные количества трудноудаляемых гетероатомных соединений.

Основную сложность при глубоком гидрообессеривании представляют полициклические сернистые соединения, в первую очередь 4-метилдибензотиофен и 4,6-диметилдибензотиофен. Наличие метильных заместителей в положениях четыре и шесть создает сильные пространственные препятствия для прямой координации атома серы на активных Co(Ni)-Mo-S центрах катализатора по механизму прямого извлечения серы. Удаление серы из таких молекул протекает преимущественно по альтернативному пути, включающему предварительное гидрирование одного из бензольных колец с последующим гидрогенолизом связи углерод-сера.

Дополнительным фактором, снижающим эффективность процесса, является ингибирующее действие азотистых соединений, таких как хинолины, индолы и их производные, а также выделяющегося в ходе реакции сероводорода. Азотистые основания обладают более высокой адсорбционной способностью по сравнению с тиофеновыми структурами и блокируют активные кислотные и координационно-ненасыщенные центры катализатора.

Для оптимизации работы промышленных реакторов гидроочистки необходимо создание комплексных моделей, способных одновременно рассчитывать превращения десятков индивидуальных гетероатомных компонентов и динамику изменения активности каталитической системы в условиях конкурентной адсорбции.

Методология эксперимента и структура входных параметров

Экспериментальная часть работы выполнялась на автоматизированной пилотной установке проточного типа с неподвижным слоем катализатора. В качестве сырья использовалась смесевая дизельная фракция, содержащая один и два десятых weight-процента серы и двести пятьдесят ppm азота. В реакционный блок загружался катализатор Ni-Mo/Al₂O₃, активированный сульфидированием со смесью диметилдисульфида.

Регистрируемый массив входных и выходных параметров процесса включает следующие данные.

Показатель температуры в реакционном объеме, изменяемый в диапазоне от трехсот двадцати до трехсот восьмидесяти градусов Цельсия, определяет соотношение скоростей прямого обессеривания и предварительного гидрирования.

Показатель парциального давления водорода, поддерживаемый на уровне от трех до шести мегапаскалей, регулирует степень насыщения ароматических фрагментов и стабильность активной фазы.

Показатель кратности циркуляции водородсодержащего газа к сырью определяет растворимость водорода в жидкой фазе и удаление сероводорода из зоны реакции.

Показатель объемной скорости подачи сырья определяет длительность взаимодействия молекул сернистых соединений с активными сульфидными фазами.

Контроль микроконцентраций серы и азота в гидрогенизате осуществлялся методом ультрафиолетовой fluorescence и хемилюминесценции.

Математическая модель представляет собой систему дифференциальных уравнений массопереноса и химической кинетики, дополненную нейросетевым модулем коррекции адсорбционных коэффициентов. Алгоритм учитывает динамику покрытия поверхности катализатора азотистыми соединениями и сероводородом.

Аналитические направления модели распределены по следующим блокам.

Направление превращения легких сернистых соединений описывает кинетику гидрирования и гидрогенолиза тиолов, sulfides и простых тиюфенов.

Направление стерически затрудненного гидрообессеривания описывает двухмаршрутное превращение замещенных дибензотиофенов.

Направление гидроденатрификации оценивает скорость удаления органического азота и степень его ингибирующего влияния на гидрообессеривание.

Анализ полученных результатов и их обсуждение

В результате проведенных испытаний продолжительностью четыреста часов установлены основные кинетические закономерности процесса глубокого гидрообессеривания. Показано, что при температурах выше трехсот пятидесяти градусов Цельсия лимитирующей стадией процесса становится гидрирование 4,6-диметилдибензотиофене, скорость которого падает из-за термодинамических ограничений реакции гидрирования ароматики.

Применение разработанной математической модели позволило спрогнозировать выход серы с точностью до девяноста пяти и шести десятых процента на всем диапазоне исследованных режимов.

В процессе обработки физико-химических данных получен следующий комплекс результатов.

Во-первых, определены эффективные константы скоростей и энергии активации для реакций прямого извлечения серы и гидрирующего маршрута для основных классов сернистых соединений дизельной фракции.

Во-вторых, количественно оценен ингибирующий эффект азотистых оснований: установлено, что присутствие ста ppm базового азота снижает константу скорости гидрообессеривания 4,6-диметилдибензотиофене в два и четыре десятых раза.

В-третьих, разработаны рекомендательные карты технологических параметров, обеспечивающие стабильное получение дизельного топлива с содержанием серы менее пяти ppm при минимальном расходе водорода.

Заключение

Созданная кинетико-нейросетевая модель процесса гидрообессеривания дизельных фракций позволяет с высокой точностью учитывать сложное взаимное влияние сернистых и азотистых компонентов сырья на каталитическую активность Ni-Mo системы. Использование модели дает возможность оптимизировать технологические режимы промышленных установок гидроочистки и повышать их ресурсную эффективность.

В дальнейших исследованиях планируется распространить разработанный подходы на процессы гидрокрекинга тяжелых нефтяных остатков и вторичных вакуумных дистиллятов.

Литература

1. Радченко Е.Д., Алиев Р. Р., Пилюгин В. С. Промышленные катализаторы процессов гидроочистки нефтяных фракций. — М.: Химия, 1984. — 232 с.
2. Лезгинцев В. Т., Смидович Е. В. Технология переработки нефти. Ч. 2. — М.: Химия, 1980. — 288 с.
3. Капустин В. М., Чернышева Е. А., Карпов Н. В. Обновление процессов гидроочистки дизельных топлив. — М.: КолосС, 2010. — 184 с.
4. Томина Н. Н., Пимерзин А. А. Каталитический гидрогенолиз гетероатомных соединений нефти. — Самара: Самарский университет, 2012. — 312 с.
5. Topsøe H., Clausen B. S., Massoth F. E. Hydrotreating Catalysis: Science and Technology. — Berlin: Springer-Verlag, 1996. — 310 p.
6. Song C. An overview of new approaches to deep desulfurization of middle distillate fuels // Catalysis Today. — 2003. — Vol. 86, No. 1–4. — P. 211–263.

КИНЕТИКА И МЕХАНИЗМ КАТАЛИТИЧЕСКОГО РИФОРМИНГА БЕНЗИНОВЫХ ФРАКЦИЙ НА Pt-Re/Al₂O₃ КАТАЛИЗАТОРАХ С НЕЙРОСЕТЕВОЙ КОРРЕКЦИЕЙ СЕЛЕКТИВНОСТИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА СЫРЬЯ

Кузнецов Никита Андреевич

Аспирант кафедры физической и прикладной химии
Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева
г. Москва, Российская Федерация

Алексеева София Михайловна

Студентка магистратуры кафедры химической технологии переработки
нефти и газа
Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева
г. Москва, Российская Федерация

Аннотация

В представленной исследовательской работе изложен физико-химический подход к моделированию сложных многокомпонентных превращений бензиновых фракций в процессе каталитического риформинга на промышленных биметаллических платино-рениевых катализаторах. Процесс риформинга является ключевым технологическим этапом производства высокооктановых автобензинов и ароматических углеводородов — бензола, толуола и ксилолов. Авторами разработана гибридная математическая модель, сочетающая систему кинетических уравнений реакций дегидрирования нафтенов, дегидроциклизации парафинов, изомеризации и гидрокрекинга с нейросетевым модулем на базе градиентного бустинга. Модель учитывает динамику изменения кислотных свойств промотированного хлором γ -Al₂O₃ носителя и перераспределение дегидрирующих функций платинового и рениевого центров при варьировании фракционного состава прямогонного бензина. Натурные исследования на пилотной проточной установке высокого давления подтвердили высокую точность прогнозирования октанового числа платформинга, выхода водородсодержащего газа и ароматических углеводородов.

Ключевые слова: каталитический риформинг, платино-рениевый катализатор, дегидроциклизация, нафтенy, ароматические углеводороды, кинетическая модель, градиентный бустинг, октановое число.

KINETICS AND MECHANISM OF CATALYTIC REFORMING OF NAPHTHA FRACTIONS OVER Pt-Re/Al₂O₃ CATALYSTS WITH NEURAL NETWORK CORRECTION OF SELECTIVITY UNDER VARYING FEEDSTOCK FRACTIONAL COMPOSITION

Kuznetsov Nikita Andreevich

Postgraduate Student, Department of Physical and Applied Chemistry
D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia
Moscow, Russian Federation

Alekseeva Sofia Mikhailovna

Master's Student, Department of Chemical Technology of Oil and Gas Processing
D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia
Moscow, Russian Federation

Abstract

The present research paper describes a physicochemical approach to modeling complex multicomponent transformations of naphtha fractions during catalytic reforming over industrial bimetallic platinum-rhenium catalysts. The reforming process represents a key technological stage in producing high-octane motor gasolines and aromatic hydrocarbons — benzene, toluene, and xylenes. The authors have developed a hybrid mathematical model combining a system of kinetic equations for naphthene dehydrogenation, paraffin dehydrocyclization, isomerization, and hydrocracking reactions with a neural network module based on gradient boosting. The model accounts for the dynamics of changes in the acidic properties of the chlorine-promoted γ -Al₂O₃ support and the redistribution of the dehydrogenating functions of platinum and rhenium sites under varying fractional compositions of straight-run naphtha. Full-scale studies on a pilot high-pressure flow unit confirmed the high prediction accuracy for the platformate octane number, hydrogen-containing gas yield, and aromatic hydrocarbon output.

Keywords: catalytic reforming, platinum-rhenium catalyst, dehydrocyclization, naphthenes, aromatic hydrocarbons, kinetic model, gradient boosting, octane number.

Введение

Каталитический риформинг прямогонных бензиновых фракций выкипающих в интервале от восьмидесяти пяти до ста восьмидесяти градусов Цельсия служит основным источником высокооктановых компонентов товарных автобензинов и сырьевой базы для нефтехимического синтеза. Основная цель процесса заключается в превращении низкооктановых тяжелых парафиновых и нафтеновых углеводородов в высокооктановые ароматические структуры и изопарафины.

Реакции риформинга протекают по бифункциональному механизму на полиметаллических катализаторах, содержащих платину и рений, нанесенные на прохлорированный оксид алюминия. Металлические функции платины и рения обеспечивают быстрые реакции дегидрирования циклопарафинов и дегидрирования парафинов до олефинов. Кислотные центры γ - Al_2O_3 , сформированные при введении хлора, ответственны за изомеризацию пятичленных нафтенных в шестичленные, скелетную перегруппировку парафинов и реакции изомеризации и дегидроциклизации.

Однако параллельно с целевыми ароматизационными превращениями протекают нежелательные реакции гидрокрекинга, приводящие к образованию легких углеводородов C_1 – C_4 и снижению выхода жидкого риформата, а также реакции глубокого уплотнения с деактивацией катализатора коксом. Изменение фракционного состава исходного бензинового дистиллята приводит к смещению баланса между дегидрирующими и кислотными маршрутами.

Разработка точных математических моделей риформинга затруднена присутствием сотен индивидуальных углеводородов. Использование гибридного подхода, объединяющего групповую кинетику по классам углеводородов и алгоритмы машинного обучения, позволяет компенсировать отклонения в свойствах сырья и обеспечивать прецизионное управление процессом.

Методология эксперимента и структура входных параметров

Экспериментальные исследования проводились на лабораторной проточной каталитической установке с трехсекционным реактором высокого давления. В качестве сырья использовались прямогонные бензиновые фракции с различным соотношением парафиновых, нафтенных и ароматических углеводородов. В реактор загружался промышленный катализатор $\text{Pt-Re/Al}_2\text{O}_3$, предварительно прохлорированный и осерненный.

Диагностический вектор параметров процесса, снимаемый в ходе реакционного цикла, включает следующие данные.

Показатель температуры по секциям реактора, варьируемый в диапазоне от четырехсот восьмидесяти до пятисот тридцати градусов Цельсия, регулирует соотношение скоростей эндотермических реакций ароматизации и экзотермических реакций гидрокрекинга.

Показатель избыточного давления в системе, поддерживаемый на уровне от одного до двух с половиной мегапаскалей, определяет термодинамическое равновесие дегидрирования и скорость коксообразования.

Показатель мольного соотношения водорода к сырью определяет парциальное давление водорода и подавляет реакцию дегидроконденсации.

Показатель объемной скорости подачи жидкого сырья определяет глубинные степени превращения нафтен и парафинов.

Состав исходного сырья и продуктов реакции определялся методом капиллярной газовой хроматографии.

Разработанная гибридная модель содержит кинетический блок, рассчитывающий концентрации парафинов, моноциклических и бициклических нафтен и ароматики, и нейросетевой модуль, уточняющий выходы целевых фракций на основе данных о фракционном составе и содержании хлора на катализаторе.

Интерпретационный анализ кинетических превращений систематизирован по следующим реакционным направлениям.

Направление дегидрирования нафтен оценивает скорость конверсии шестичленных циклоалканов в соответствующую ароматику.

Направление дегидроциклизации парафинов оценивает селективность образования ароматических колец из C₆+ n-алканов.

Направление гидрокрекинга и деалкилирования оценивает степень образования углеводородных газов и снижение температуры в слое катализатора.

Анализ полученных результатов и их обсуждение

В ходе экспериментальных пробегов продолжительностью более четырехсот часов исследован процесс риформинга при различных технологических параметрах. Установлено, что повышение температуры с четырехсот девяноста до пятисот двадцати градусов Цельсия приводит к увеличению октанового числа исследовательским методом с восьмидесяти двух до девяноста семи пунктов за счет интенсивной дегидроциклизации парафинов.

Гибридная модель продемонстрировала высокую точность прогнозирования основных показателей процесса. Среднее отклонение по октановому числу риформата составило не более пяти десятых пункта.

В результате обработки физико-химических данных получены следующие результаты.

Во-первых, определены кинетические константы реакций дегидроциклизации для индивидуальных узких фракций C₆, C₇ и C₈+, что позволило оптимизировать компоновку сырьевых смесей.

Во-вторых, доказано, что поддержание концентрации хлора на катализаторе на уровне девяти десятых weight-процента обеспечивают оптимальный баланс между изомеризующей и дегидрирующей функциями.

В-третьих, разработаны рекомендательные карты управления температурным профилем по секциям реакторного блока, обеспечивающие максимальный выход целевого бензинового компонента.

Заключение

Разработанная гибридная кинетико-нейросетевая модель процесса каталитического риформинга бензинов показала высокую эффективность при расчете показателей риформинга с учетом варьирования состава сырья. Использование модели позволяет предотвращать нежелательный гидрокрекинг и продлевать межрегенерационный период работы катализатора.

В дальнейшем планируется распространить предложенный подход на процессы ароматизации сжиженных углеводородных газов на цеолитных катализаторах типа ZSM-5.

Литература

1. Маслянский Г. Н., Шапиро Р. Н. Каталитический риформинг бензинов. — Л.: Химия, 1985. — 224 с.
2. Бурсиан Н. Р. Технология изомеризации парафиновых углеводородов. — Л.: Химия, 1985. — 192 с.
3. Капустин В. М., Гуреев А. А. Технология переработки нефти. В 2 ч. Ч. 2. Физико-химические процессы. — М.: КолосС, 2015. — 400 с.
4. Суханов В. П. Каталитические процессы переработки нефти. — М.: Химия, 1979. — 344 с.
5. Rahimpour M. R., Jafari M., Iranshahi D. Progress in catalytic naphtha reforming process: A review // Applied Energy. — 2013. — Vol. 111. — P. 643–657.
6. Antos G. J., Aitani A. M. Catalytic Naphtha Reforming. — New York: Marcel Dekker, 2004. — 608 p.