

## Abstract

Based on the analysis of currently used methods for improving the tribotechnical characteristics of lubricants, we have shown the prospects of using thermotropic metallomesogens, for example, copper carboxylates, as triboactive additives to them. This served as a starting point in the further study of some greases, and the effect on their antifriction, anti-wear and extreme pressure properties of the joint introduction of carbon nanotubes and copper carboxylates. It turned out that their joint introduction makes it possible to significantly improve the tribotechnical performance of hydrocarbon-based lubricants due to their synergistic effect and the formation of strong stable liquid crystal films in the friction zone.

*Keywords:* metallomesogens, lubrication, friction, carbon nanotubes.

УДК 621.3

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-267

Р.В. Корнеев, М.А. Скотникова  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия. krvthecreator@gmail.com

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА АВТОМАТИЗАЦИИ МОНИТОРИНГА ИЗНОСА НА ГАЗОПРОВОДЕ

### Аннотация

В работе рассмотрены основные методы автоматизации мониторинга износа на поверхностях трубопровода и рулевой тяги оборудования. Предложен простой в применении алгоритм автоматического обнаружения повреждений магистрального трубопровода на основе вибрации и данных. Этот подход позволил обнаруживать повреждения с помощью одного акселерометра на контролируемой тяге, не требует знания физических переменных, например, осевой нагрузки на рулевую тягу, временных проверок и может выполняться без присмотра человека-оператора.

Применение процедуры очистки данных, алгоритм обнаружения повреждений, основанный на методе MSD (квадрат расстояния Махаланобиса), построения логистических кривых (регрессии) ROC, позволили полностью автоматически осуществить мониторинг рулевой тяги с помощью одного датчика и простого алгоритма, который не требует знания физических переменных, например, осевой нагрузки на рулевую тягу.

Показано, что с увеличением повреждений и увеличения коэффициента модального затухания от  $\xi=5/8L$  до  $\xi=8/10L$ , графики ROC-кривой проходят через верхний левый угол, где доля истинно положительных результатов составляет 100%, а предсказательная способность модели возрастает, особенно, когда результаты представлены со скользящим средним.

*Ключевые слова:* автоматизация, мониторинг износа, газопровод.

### Введение

Магистральным газопроводом называется трубопровод, предназначенный для транспортировки газа из района добычи в районы его потребления. Движение газа по магистральному газопроводу обеспечивается компрессорными станциями, сооружаемыми по трассе через определенные расстояния (рис.1).

Для управления потоками газа, транспортируемого по газопроводам, используется трубопроводная арматура. В качестве газоперекачивающих агрегатов применяются поршневые газомотокомпрессоры в котором объединены силовая часть (привод) и компрессор для сжатия газа.

Как показывает статистика, протяженность линейной части магистральных трубопроводов в Российской Федерации составляет более 242 тыс. км, из которых газопроводы — 166 тыс. км. Основная часть газопроводных труб проходит под землей, поэтому на их стенки воздействуют коррозионно-активные грунтовые воды [1-4]. Возникающий значительный коррозионно-механический износ (разрушение) металла поверхности труб составляет 63%, а уменьшение толщины стенок труб, в свою очередь, может привести к возникновению аварийных ситуаций на магистральных газопроводах [5-7].



Рисунок 1. Компрессорная станция на трассе магистрального газопровода.

К основным причинам сбоев в работе деталей оборудования, относятся четыре механизма износа: коррозия, усталость, адгезия и абразивное изнашивание.

Поэтому, для обнаружения повреждений в газопроводе, скрытых под землей, разрабатываются современные автоматизированные технологии мониторинга износа труб в режиме реального времени с применением неразрушающих методов контроля [8-13].

Целью данной работы явилось совершенствование автоматизированных технологий обнаружения реальных повреждений работающих рулевых тяг на магистральных газопроводах.

### **Методы и материалы**

В работе применяется процедура очистки данных, алгоритм обнаружения повреждений, основанный на методе оценки квадрата расстояния Махаланобиса MSD (square of the Mahalanobis distance) [14].

На рисунке 2 два наблюдения изображены в виде красных точек. Центр класса изображен в виде синей точки.

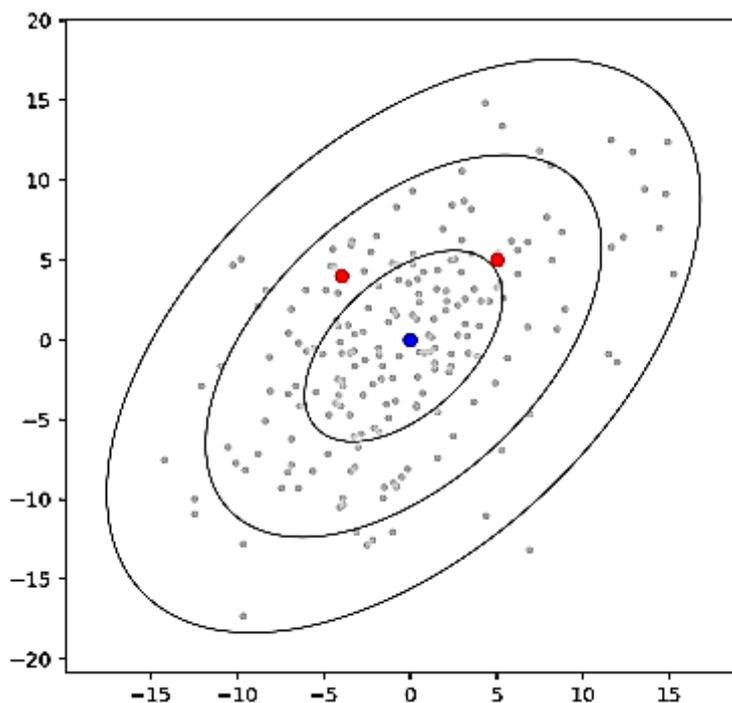


Рисунок 2. Двумерные данные с эллипсами прогноза

Для ответа на вопрос — какое наблюдение ближе к центру класса, надо произвести измерения расстояний от красных точек до центра. С помощью расстояния Махаланобиса можно полностью автоматически определять сходство неизвестной и известной выборки. Как показали результаты экспериментальной компании, представленная стратегия позволяет успешно выявлять реальный ущерб под воздействием неконтролируемых эксплуатационных и экологических изменений.

В работе применяются модальные испытания и модальный анализ для определения собственных частот, коэффициентов демпфирования и модальных форм (мод) собственных колебаний любой конструкции.

Суть метода модального анализа состоит в том, что сигналы вибрационного возбуждения и измеренные сигналы отклика сложной конструкции, трудные для непосредственного восприятия, преобразуются в набор легко прогнозируемых модальных параметров.

С помощью характеристики оператора приемника, то есть, логистической регрессии ROC-кривой (Receiver Operator Characteristic) можно оценивать вероятность того, что интересующее событие произойдет (положительный исход события).

ROC-кривая наиболее часто используется для представления результатов двойной (бинарной) классификации в машинном обучении. Поскольку классов два, один из них называется классом с положительными, второй — с отрицательными исходами. ROC-кривая выявляет предсказательную способность модели, зависимость количества верно классифицированных положительных примеров от количества неверно классифицированных отрицательных примеров.

Расчетное значение уравнения регрессии « $y$ » может принимать значения от 0 (отрицательный исход события) до 1 (положительный исход события). « $P$ » — вероятность того, что произойдет интересующее событие. Зависимость, связывающая вероятность события  $P$  и величину  $y$ , показана на рисунке 3.

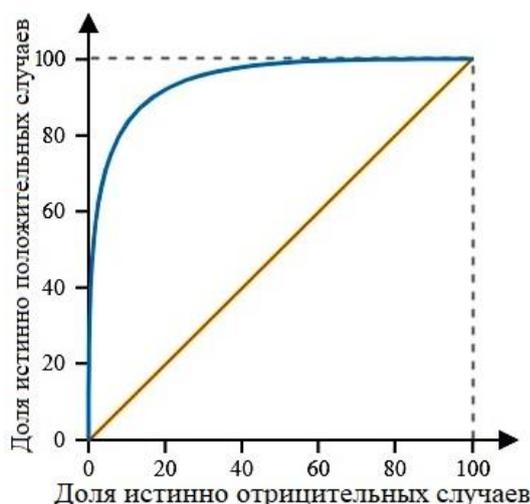


Рисунок 3. Логистическая регрессия. ROC-кривая.

Если предсказательная способность модели высока, график ROC-кривой проходит через верхний левый угол, где доля истинно положительных случаев составляет 100% или 1.0, а доля ложно положительных примеров равна нулю. Наоборот, чем меньше изгиб кривой и чем ближе она расположена к диагональной прямой (неразличимости двух классов), тем модель менее эффективна.

### Результаты и обсуждение

#### *Стратегия обнаружения повреждений.*

Если рассматривается количество  $M$  режимов вибрации,  $M$  собственные частоты  $f_m$  ( $m = 1, 2, \dots, M$ ) можно сохранить в векторе признаков  $\mathbf{v}$ , определенном следующим образом:

$$\mathbf{v} = \{f_1, f_2, \dots, f_m, \dots, f_M\}^T \quad (1)$$

где верхний индекс «Т» указывает на транспонирование. В более общем смысле,  $m = 1$  указывает на первую рассматриваемую собственную частоту, не обязательно связанную с первой модой вибрации. С точки зрения непрерывного мониторинга идентификация собственных частот может повторяться несколько раз  $N_{rec}$ , а собственные частоты могут храниться в матрице размером  $N_{rec} \times M$  следующим образом:

$$\mathbf{B} = \begin{Bmatrix} \mathbf{v}_1^T \\ \mathbf{v}_2^T \\ \vdots \\ \mathbf{v}_r^T \\ \vdots \\ \mathbf{v}_{N_{rec}}^T \end{Bmatrix} \quad (2)$$

где  $r = 1, 2, \dots, N_{rec}$ .

#### *Индекс урона*

Новое наблюдение вектора признаков в течение периода мониторинга, когда состояние работоспособности рулевой тяги неизвестно, называется  $\mathbf{v}^{new}$ , и можно использовать многомерные метрики, чтобы проверить, является ли  $\mathbf{v}^{new}$  выбросом по отношению к  $\mathbf{B}^{ref}$ . Индекс повреждения можно определить путем расчета MSD между  $\mathbf{v}^{new}$  и  $\mathbf{B}^{ref}$  согласно следующему выражению:

$$DI = MSD(\mathbf{v}^{new}, \mathbf{B}^{ref}) = (\mathbf{v}^{new} - \boldsymbol{\mu}_B^{ref})^T \left( \sum \mathbf{B}^{ref} \right)^{-1} (\mathbf{v}^{new} - \boldsymbol{\mu}_B^{ref}) \quad (3)$$

где  $\mathbf{V}^{\text{ref}}$  — вектор-столбец размера  $M \times 1$ ,  $m$ -й элемент — это среднее значение  $m$ -го столбца  $\mathbf{V}^{\text{ref}}$ ,  $\Sigma \mathbf{V}^{\text{ref}}$  — ковариационная матрица, связанная с  $\mathbf{V}^{\text{ref}}$ , а верхний индекс «-1» означает обратную величину.

В данной работе был принят подход, основанный в рамках метода Монте-Карло, в соответствии с описанной процедурой, в которой фигурирует эксклюзивный порог  $t$ :

$$t = \frac{(N_{\text{rec}} - 1)(N_{\text{rec}} + 1)^2 t^*}{N_{\text{rec}}(N_{\text{rec}}^2 - (N_{\text{rec}} + 1)t^*)} \quad (4)$$

Пороговый уровень зависит как от количества наблюдений ( $N_{\text{rec}}$ ), так и от количества переменных ( $M$ ) изучаемой задачи.

#### Автоматическая идентификация и очистка данных

Когда окружающая среда обеспечивает случайное возбуждение тяги, каждая собственная частота может быть идентифицирована посредством наилучшего соответствия между экспериментальным спектром мощности ответа  $G_{yy}$ ,  $\exp(\omega)$ , функцией угловой частоты  $\omega$  ( $\omega=2\pi f$ , где  $f$  — частота, выраженная в Гц), и аналитический спектр мощности отклика механической системы SDOF с собственной частотой  $f_m$ , возбуждаемой белым шумом, определяемый следующим выражением:

$$G_{yyid}(\omega f_m \zeta_m X_m A_m) = \left| \frac{X_m}{-\omega^2 + j2\zeta_m(2\pi f_m)\omega + (2\pi f_m)^2} + A_m \right|^2 \quad (5)$$

где  $j$  — мнимая единица,  $\zeta_m$  —  $m$ -й коэффициент модального затухания (величина, определяющая степень потерь энергии УЗ волны за счет рассеяния и перехода энергии в тепловую),  $X_m$  — константа (функция уровня белого шума, компонента собственного вектора в точке измерения и модального коэффициента участия), а  $A_m$  — вклад внеполосные режимы. Чтобы обеспечить более компактное обозначение, эти параметры сгруппированы в вектор  $\Theta_m = \{f_m, \zeta_m, X_m, A_m\}$  такой, что  $G_{yyid}(\omega, \Theta_m)$ .

Преимущество этого простого метода заключается в том, что можно использовать один акселерометр, если датчик расположен в положении, не близком к узлу рассматриваемого режима вибрации.

На рисунках 4 и 5 представлены хронологии испытания в коррозионной среде рулевой тяги с коэффициентом модального затухания  $\xi=5/8L$  и  $\xi=9/10L$ , соответственно.



Рисунок 4 – Хронология испытания в коррозионной среде рулевой тяги с коэффициентом модального затухания  $\xi=5/8L$

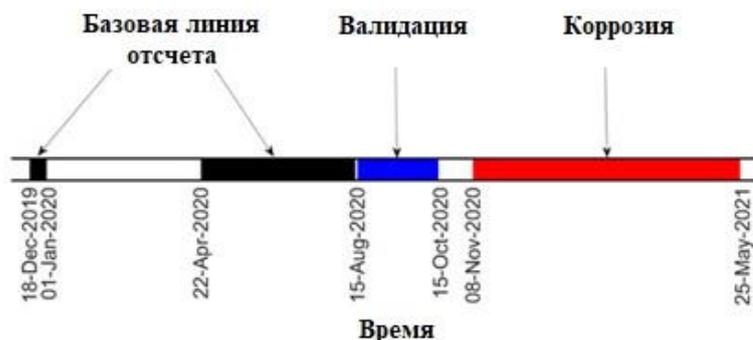


Рисунок 5 – Хронология испытания в коррозионной среде рулевой тяги с коэффициентом модального затухания  $\xi=9/10L$

Исследованные данные модального затухания были собраны из множества разных источников. Информация получилась разнородной, содержит ошибки, пустые значения, дубли и др., которые мешают анализу (см. рис. 6 и рис. 7).

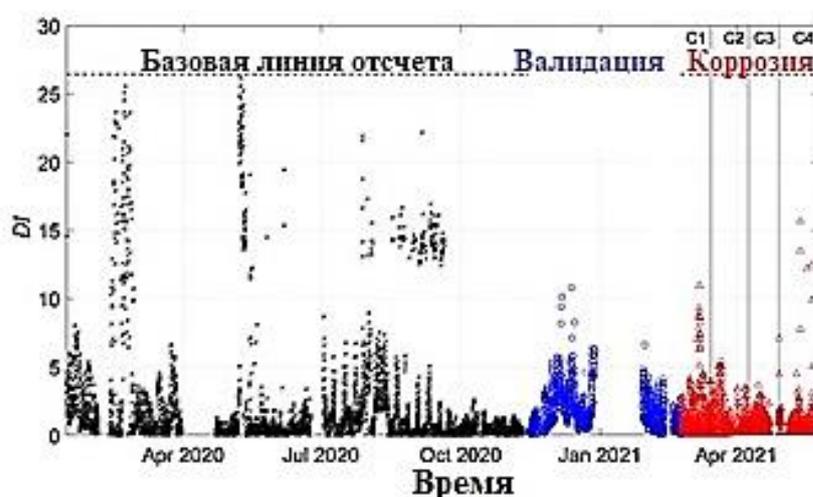


Рисунок. 6 – Показания модального затухания до применения метода очистки данных.

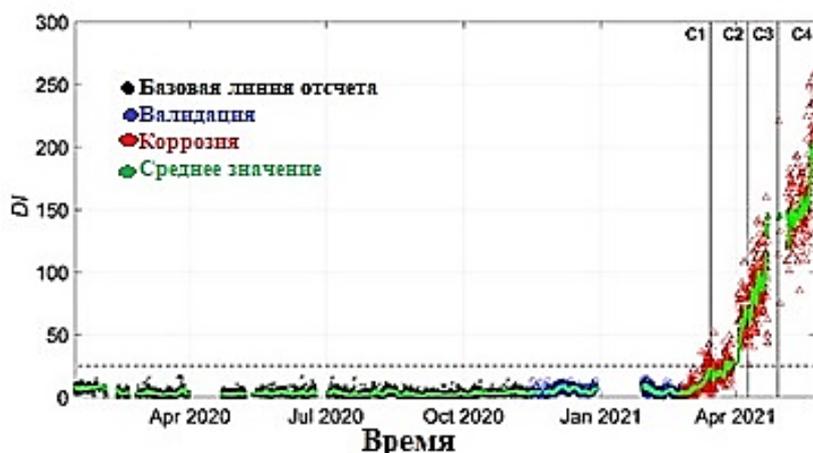


Рисунок. 7 – Показания модального затухания до применения метода очистки данных

Метод очистки данных позволил избавиться от большинства ошибок с помощью специальных инструментов и алгоритмов, сделал будущий анализ более точным (см. рис. 8). Очистка данных — это ещё и важный этап машинного обучения, позволяющий получить более адекватные результаты.

Модальные испытания и модальный анализ являются незаменимыми инструментами для определения собственных частот, коэффициентов демпфирования и форм (мод) собственных колебаний) — важное средство изучения вибрационных характеристик механических конструкций.

Суть метода модального анализа в том, что сигналы вибрационного возбуждения и измеренные сигналы отклика сложной конструкции, трудные для непосредственного восприятия, преобразуются в набор легко прогнозируемых модальных параметров [15].

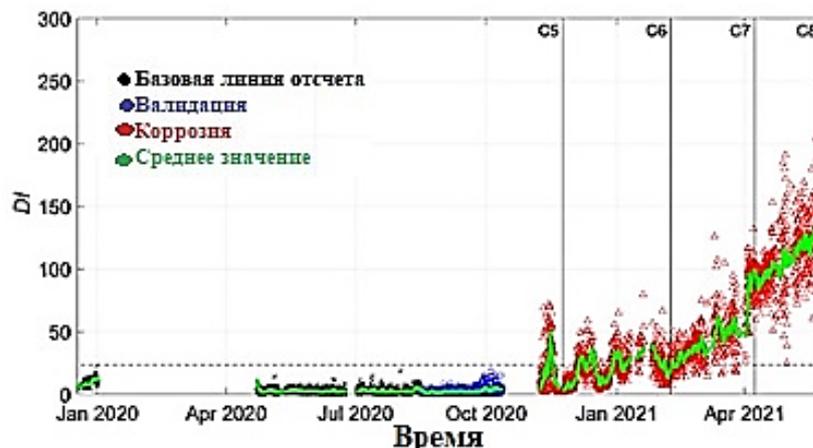


Рисунок 8 – Показания модального затухания после применения метода очистки данных

С помощью логистических регрессий (ROC- кривых) оценили вероятность того, что произойдет интересное событие (положительный исход события). Испытания рулевой тяги в коррозионной среде проводили с коэффициентами модального затухания  $\xi=5/8L$  (см. рис. 9) и  $\xi=8/10L$  (см. рис. 10).

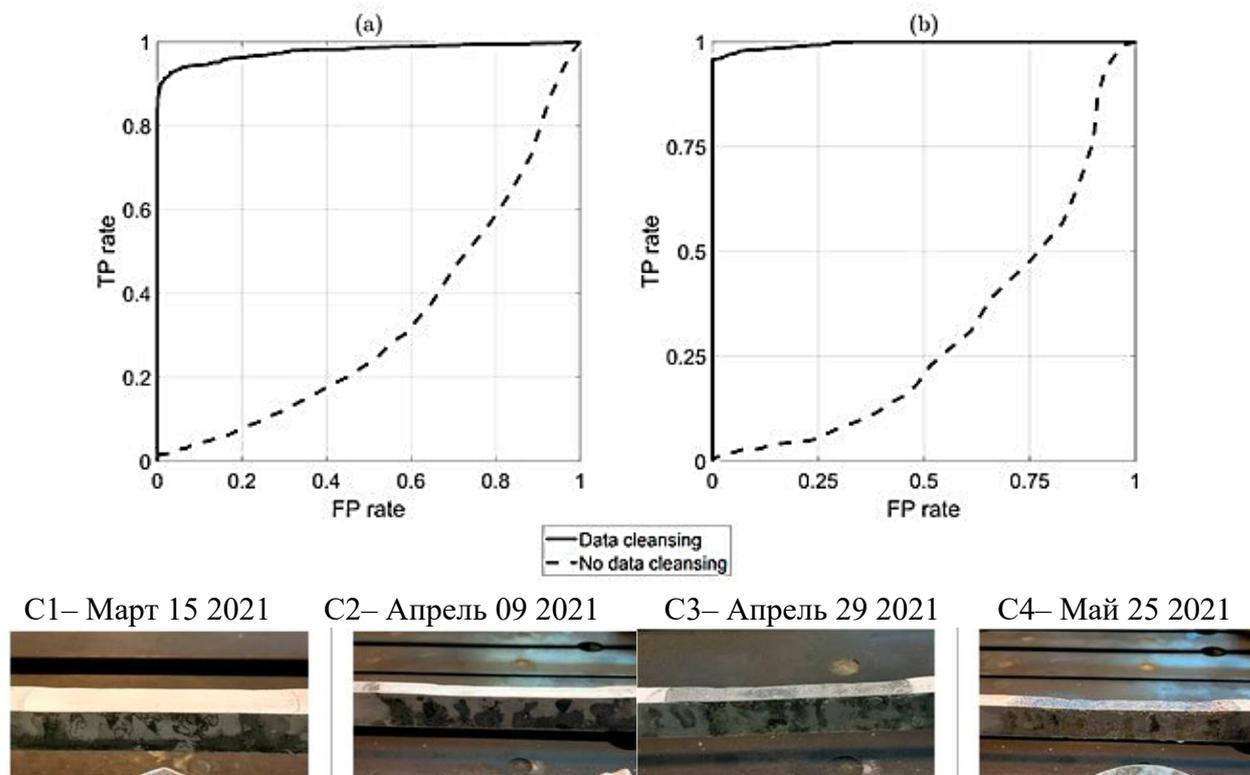


Рисунок 9 – Сравнение логистических кривых (регрессии) ROC между принятием (черная сплошная линия) или отказом от применения (черная пунктирная линия) процедуры автоматической очистки данных перед обнаружением повреждения (коэффициент модального затухания  $\xi=5/8L$ ). Результаты представлены без (а) и с (б) скользящим средним. TP – истинно положительно, FP – истинно отрицательно.

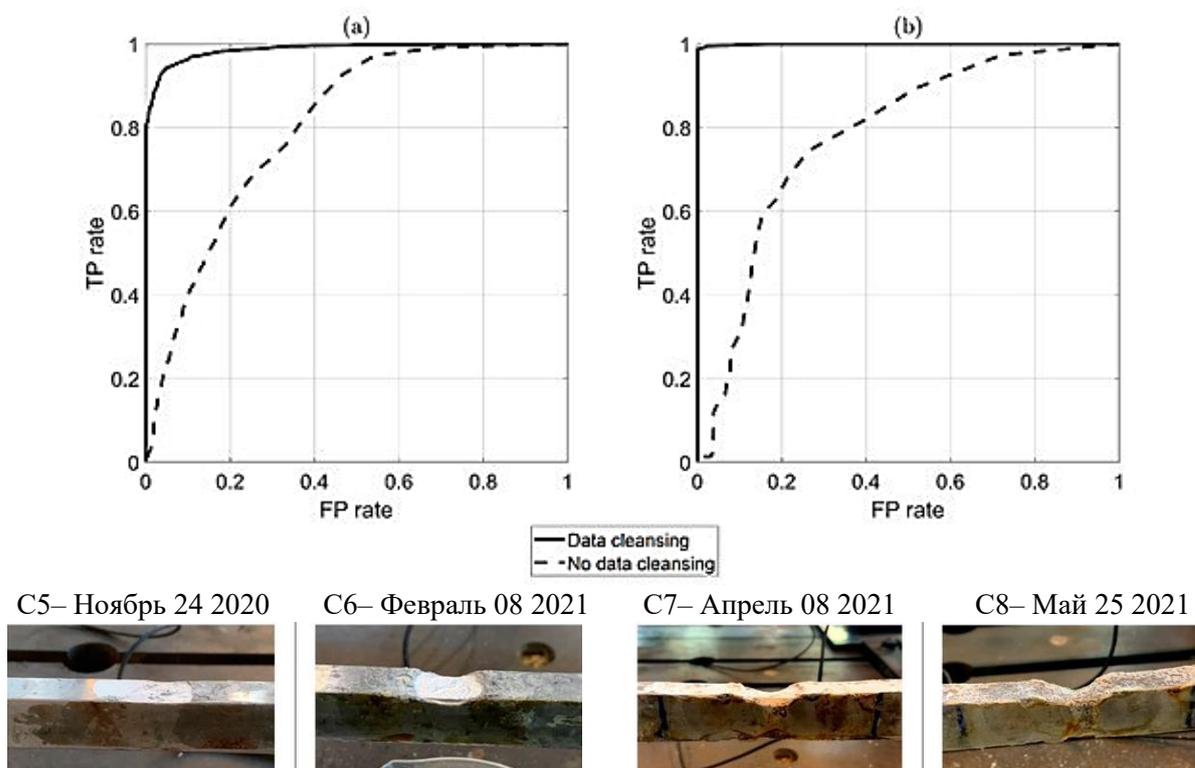


Рисунок 10 – Сравнение логистических кривых (регрессии) ROC между принятием (черная сплошная линия) или отказом от применения (черная пунктирная линия) процедуры автоматической очистки данных перед обнаружением повреждения (коэффициент модального затухания  $\xi=8/10L$ ). Результаты представлены без (а) и с (б) скользящим средним. TP – истинно положительно, FP – истинно отрицательно.

### Заключение

Применение процедуры очистки данных, алгоритма обнаружения повреждений, основанный на методе MSD (квадрат расстояния Махаланобиса), построения логистических кривых (регрессии) ROC, позволили полностью автоматически осуществить мониторинг рулевой тяги с помощью одного датчика и простого алгоритма, который не требует знания физических переменных, например, осевой нагрузки на рулевую тягу.

Показано, что с увеличением повреждения и увеличения коэффициента модального затухания от  $\xi=5/8L$  до  $\xi=8/10L$ , графики ROC-кривой проходят через верхний левый угол, где доля истинно положительных результатов составляет 100%, а предсказательная способность модели возрастает, особенно, когда результаты представлены со скользящим средним (рис. 8, рис. 9,б и рис.10,б).

Таким образом, представленный метод позволяет успешно выявлять реальные неконтролируемые эксплуатационные и экологические повреждения работающих рулевых тяг на магистральных газопроводах.

### Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00178, <https://rscf.ru/project/22-19-00178/>.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Медведева М.Л. Основы электрохимической коррозии и защиты оборудования при транспорте и хранении нефти и газа. Москва 2004;

2. Герасимов, Валентин Владимирович. Прогнозирование коррозии металлов. - М.: Металлургия, 1989. - 151с. - ISBN 5-229-00513-0;
3. Защита трубопровода от коррозии: учеб. пособие для вузов/ Ф. М. Мустафин [и др.]. - СПб.: Недра, 2005 – 2007 Т. 1. - 2005. - 617 с.: цв. ил., табл., фото. - Библиогр.: с. 547;
4. Воробьева Г. Я. Коррозионная стойкость материалов в коррозионных средах химических производств. — М.: Химия, 1975.
5. Шумайлов А.С., Гуменов А.Г., Молдованов О.И. Диагностика магистральных трубопроводов. – М.: Недра, 1992. – 251 с.
6. Анализ аварий и несчастных случаев на трубопроводном транспорте России: учеб. пособие для вузов/ Под ред. Б.Е. Прусенко, В.Ф. Мартынюка. – М.: Анализ опасностей, 2003. – 351 с.
7. Шумайлов А.С., Гуменов А.Г., Молдованов О.И. Диагностика магистральных трубопроводов. – М.: Недра, 1992. – 251 с.
8. Francescantonio Lucà, Stefano Manzoni, Alfredo Cigada, Silvia Barella, Andrea Gruttadauria and Francesco Cerutti. - Automatic Detection of Real Damage in Operating Tie-Rods / Politecnico di Milano-Department of Mechanical Engineering, Via La Masa, 20156 Milan, Italy. Sensors 2022, 22(4), 1370.
9. Omar Awadallah, Ayan Sadhu. - Automated multiclass structural damage detection and quantification using augmented reality / Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience Volume 2, Issue 1, March 2023, 100024.
10. Mahjoub El Mountassir, Gilles Mourot, Slah Yaacoubi, Didier Maquin. - Damage Detection and Localization in Pipeline Using Sparse Estimation of Ultrasonic Guided Waves Signals / IFAC-PapersOnLine, France Volume 51, Issue 24, 2018, Pages 941-948.
11. Eybpoosh, M., Bergés, M., & Noh, H.Y. (2016). Sparse representation of ultrasonic guided waves for robust damage detection in pipelines under varying environmental and operational conditions. Structural Control and Health Monitoring, 23(2), 369-391.
12. Eybpoosh, M., Bergés, M., & Noh, H.Y. (2017). An energybased sparse representation of ultrasonic guided-waves for online damage detection of pipelines under varying environmental and operational conditions. Mechanical Systems and Signal Processing, 82, 260-278.
13. Farrar, C.R., & Worden, K. (2007). An introduction to structural health monitoring. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 365(1851), 303-315.
14. Davis J., Goadrich M. The Relationship Between Precision-Recall and ROC Curves // Proc. Of 23 International Conference on Machine Learning, Pittsburgh, PA, 2006.
15. Lowe, M.J., Alleyne, D.N., & Cawley, P. (1998). Defect detection in pipes using guided waves. Ultrasonics, 36(1-5), 147-154.

R.V. Korneev, M.A. Skotnikova  
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,  
Saint Petersburg, Russia. krvthecreator@gmail.com

## **IMPROVEMENT OF THE AUTOMATION METHOD FOR MONITORING WEAR ON THE GAS PIPELINE**

### **Abstract**

The paper considers the main methods of automation of wear monitoring on the surfaces of pipelines and tie rods of equipment. An easy-to-use algorithm for automatic detection of damage to the main pipeline based on vibration and data is proposed. This approach made it possible to detect damage using a single accelerometer on controlled thrust, does not require knowledge of physical variables, for example, axial load on the steering rod, temporary checks and can be performed without the supervision of a human

operator.

The application of the data cleaning procedure, the damage detection algorithm based on the MSD (Mahalanobis distance square) method, the construction of logistic curves (regression) ROC, made it possible to fully automatically monitor the steering rod using a single sensor and a simple algorithm that does not require knowledge of physical variables, for example, the axial load on the steering rod.

It is shown that with an increase in damage and an increase in the modal attenuation coefficient from  $\xi=5/8L$  to  $\xi=8/10L$ , the graphs of the ROC curve pass through the upper left corner, where the proportion of truly positive results is 100%, and the predictive ability of the model increases, especially when the results are presented with a moving average.

*Keywords:* automation, wear monitoring, pipeline.

The work examines the main methods for automating wear fixation on different types of surfaces and equipment, including pipelines, and expresses an opinion on how the technology can be supplemented by combining known technologies from different areas into one technology with possible development.

*Keywords:* Automation, wear fixation, gas pipeline.

УДК 621.9, 539.622

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-268

Д.И. Гладких, Е.В. Фоминов, В.А. Лебедев, В.Е. Гвинджилия, А.А. Марченко  
Донской государственный технический университет,  
Ростов-на-Дону, Россия, ya@dgladckih.ru

## **ОЦЕНКА ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЦЕССА ТОЧЕНИЯ ЖАРОПРОЧНОЙ СТАЛИ 10ГН2НМФА**

### **Аннотация**

Данное исследование посвящено оценке шероховатости обработанной поверхности и средней температуры резания при чистовом продольном точении заготовок из жаропрочной высоколегированной стали 10ГН2НМФА без применения охлаждения пластинами твёрдого сплава Т15К6. Экспериментально установлено, что зависимость средней температуры от скорости обработки в исследуемом диапазоне режимов резания носит экстремальный характер для каждого значения подачи, а значения средней шероховатости Ra при обработке острозаточенным инструментом находилась в диапазоне Ra 0.8-1.25 мкм, что соответствует 7 классу шероховатости. В ходе эволюционных трансформаций в системе резания наименьшее изменение поверхностного микрорельефа для каждого значения подачи зафиксировано при скоростях, характеризующихся минимальными температурами резания. Средняя шероховатость к концу периода стойкости пластин во всех случаях находилась в пределах Ra 1.8-2.5 мкм. Таким образом, при сухой чистовой обработке заготовок из жаропрочной стали 10ГН2НМФА с шероховатостью поверхности по 6 классу может быть использован полный ресурс пластин вплоть до критического износа, для поверхностей 7 класса шероховатости время работы пластин сокращается до 40-60% от периода стойкости. В это случае может быть получена поверхность точения заданного качества без применения дополнительных чистовых проходов и операций.

*Ключевые слова:* жаропрочная сталь, продольное точение, температура