

УДК 004.65

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСА УЗЛОВ ТРЕНИЯ ВИНТОВОГО КОМПРЕССОРА

М. Ш. Мигранов<sup>1</sup>, А. М. Мигранов<sup>2</sup>, Р. Г. Нигматуллин<sup>3</sup>, А. Ф. Садыков<sup>4</sup>

<sup>1</sup> migmars@mail.ru, <sup>2</sup> -migranov\_art\_1993@inbox.ru, <sup>3</sup> nigmatullin@himmotolog.ru, <sup>4</sup> sadykovazamat865@gmail.com

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 29.10.2018

**Аннотация.** Представлены результаты экспериментальных исследований влияния внешних факторов (температура и влажность воздуха, поступающего в приемное устройство компрессора) на износ узлов трения винтового компрессора на основе анализа физико-химического состояния смазочного материала при его эксплуатации в реальном режиме времени. Показано, что путем планомерного изменения температуры окружающего воздуха и его влажности можно добиться значительного уменьшения износа трущихся поверхностей деталей машин. При таком подходе диагностирования узлов трения существенно сокращаются затраты на обслуживание и ремонт; исключается вероятность преждевременной замены работоспособного агрегата на новый.

**Ключевые слова:** смазочный материал; диагностирование; эффективность; износ; трение; частицы износа; вязкость; кривая износа; анализ масла; температура масла; температура окружающего воздуха; влажность воздуха; затраты.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для повышения эффективности промышленного производства находит все большее применение высокопроизводительное и дорогостоящее технологическое оборудование, в котором наиболее слабым звеном, с точки зрения работоспособности и надежности, являются узлы и детали тяжелонагруженных трибосопряжений, работающие как при существенно различных температурных (условно при более легких условиях перепад температур может составлять 100–120 град.), так и климатических условиях (высокая влажность, наличие абразивов и других химических элементов в атмосфере). Как показывают результаты анализа периодичности отказов работы узлов трения, затраты на их восстановление достигают 9–20 % стоимости всего оборудования без учета существенных потерь дохода (прибыли) предприятия от простоя. Известно [1–4], что смазочный материал –

уникальный источник информации о технике, в которой он работает. По анализу смазочного материала можно на ранней стадии обнаружить изменения в режиме работы оборудования при эксплуатации и установить внутренние дефекты. Справедливо сказать, что смазочный материал является жидкой деталью любой маслonaполненной техники. К смазочному материалу в соответствии с ГОСТ 27.002-89, как и к другим деталям, применимы понятия надежности и работоспособности. Несоответствие характеристик смазочного материала стандартам может привести к выходу оборудования из строя. Вместе с тем изучение воздействия внешних факторов, таких как температура окружающего воздуха, влажность воздуха, рабочая температура смазочного материала и других факторов на износ деталей тяжелонагруженных узлов трения является актуальной задачей как с научных позиций, так и практического применения [5–8].

Исследование технического состояния компрессора основывается на изучении скорости износа узлов трения по продуктам износа накапливаемых в работающих маслах, смазывающе-охлаждающих жидкостях, консистентных смазках, датчиком скорости износа, работающего на основе электромагнитных колебаний [1–3].

### СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Известно, что на этапе разработки масел и их производства возникают проблемы, связанные с оптимизацией состава, определяемого техническими или экономическими соображениями. Аналогичные по характеру проблемы могут возникать в случае необходимости корректировки состава товарных масел (товарной продукции). Решение подобного рода задач на первом этапе требует «перебора» и проверки большого числа различных вариантов с целью выбора наиболее предпочтительного для последующей более детальной опытно-экспериментальной проверки. В то же время, принимая во внимание значительную продолжительность и стоимость последней, ее возможности на первом этапе использования существенно ограничены. Учитывая большой объем эксперимента на первом этапе исследования, ведущие фирмы, занимающиеся разработкой масел или пакетов присадок, для оптимизации состава широко используют оперативные методы анализа, призванные в большей или меньшей степени моделировать поведение масел в условиях применения. Указанные методы, как правило, отличаются от используемых при формировании нормативной или технической документации на масла и должны дополнять последние на этапе разработки масляной композиции или ее корректировки.

Большинство методов, входящих в документацию, спроецировано на контроль технологии производства. В отличие от них, оперативные методы химмотологической направленности построены по принципу определения реакции масла на внешние воздействия, типичные для условий эксплуатации, т.е. предназначенные для оценки поведения масел не в статике, а в динамике (рис. 1).

На первом участке отказы связаны с недостатками изготовления технического объекта и минимизируются с наработкой (по мере обкатки). Для повышения надежности выпускаемой техники необходимо, чтобы период ее обкатки (приработки) являлся составной частью технологического процесса производства машин и механизмов и переходил на период гарантийной эксплуатации. Второй период соответствует нормальной работе, третий – продленному сроку службы вследствие хорошего технического обслуживания, четвертый – завершению срока службы объекта.

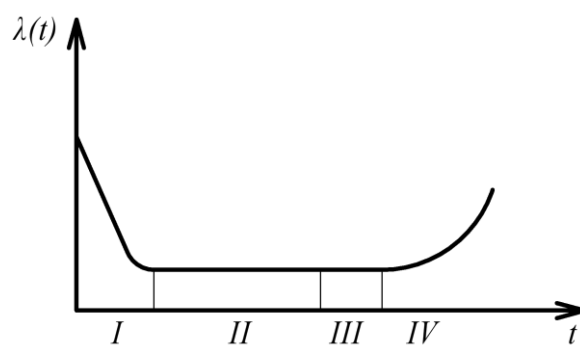


Рис. 1. Зависимость числа отказов объекта  $\lambda$  от времени работы  $t$

В дополнение к изображенному следует отметить, что прогнозирование работоспособности масел возможно осуществлять с использованием элементов теории надежности.

В свою очередь для отождествления масла с элементом конструкции двигателя необходимо количественное описание состояния масла и его изменения во времени. В общем случае наиболее продуктивным подходом в этом направлении следует считать моделирование поведения объекта (масла) в двигателе и его внутренних связей.

Применительно к поставленной задаче общие принципы моделирования, как показывает накопленный опыт, могут быть выражены блок-схемой, и при этом любые виды моделирования наиболее успешно осуществляются на базе специальных оперативных методов оценки качества масел, дающих возможность повтора эксперимента в кратчайшие сроки с необходимой схожимостью и воспроизводимостью для установления количественных связей и формирования соответствующих зависимостей.

*Цель работы* – провести оценку влияния внешних факторов на износ узлов трения винтового компрессора на основе анализа физико-химического состояния применяемого смазочного материала.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Как известно, при разработке наиболее надежных методик оценки качества масел на базе оперативных методов в той или иной степени добиваются либо физического моделирования процесса, либо используют принцип аффинного подобия. Принимая во внимание сложность процессов, протекающих в нефтепродуктах на практике, в последнее время к обработке результатов исследования широко привлекается математическое моделирование. Оно внедряется либо как самостоятельный способ моделирования и описания поведения систем, либо в дополнение к указанному выше способу.

Успешное решение задач интерпретации масла как элемента конструкции машин при прочих равных условиях достигается путем установления не столько качественных, сколько количественных соотношений между изученными свойствами и показателями.

Для формирования количественных связей между аргументами и функцией их необходимо аппроксимировать математическими зависимостями. Указанная аппроксимация возможна различными способами.

Аналитическая модель предполагает выделение и описание основных физико-химических процессов, составляющих результирующий процесс и определяющих его механизм. Эмпирическая модель строится на базе умозрительного подхода, а корреляционная – путем обработки накопленных статистических данных методами корреляционного анализа.

При прочих равных условиях установление количественных соотношений возможно как при использовании нескольких (набора) методов, характеризующих различные свойства и стороны процесса, так и одного – наиболее полно и объективно моделирующего поведение масла в реальных условиях эксплуатации.

Для повышения надежности результатов общее число методов должно быть минимизировано, а в лучшем случае сведено к одному.

В итоге результаты, полученные в динамических условиях, следует использовать при решении оптимизационных задач на диаграмме «состав – свойство», дополняя ее при необходимости экономической составляющей как важным показателем реализуемой ценовой политики.

Одним из основных условий надежной и безопасной эксплуатации машин является их контроль и диагностика непосредственно при эксплуатации. При этом контроль должен быть оперативным, своевременным и достоверным без разборки систем и вмешательства в конструкцию техники, обеспечивая ее надежную эксплуатацию в течение установленного ресурса. Диагностика по анализу работающего масла является одним из способов безразборного контроля состояния машин, так как масло является наиболее эффективным, гибким, изменяемым и контролируемым элементом и накопителем информационных признаков их состояния. Систематический оперативный контроль качества масла и статистическая обработка результатов этого контроля позволяют определять, на каких стадиях возникают дефекты в машине, устанавливать и устранять причины их образования.

Опыт показывает, что при условии контроля параметров масла в компрессорных системах при эксплуатации можно обеспечивать надежную работу машины в пределах установленного ресурса.

Диагностика технического состояния винтового компрессора осуществлялась разработанным устройством – мультимаслотестером в ООО «Химмотолог» (г. Уфа). Общий вид прибора представлен на рис. 2.

Основное устройство (датчик), работающее на электромагнитных колебаниях, устанавливается непосредственно в маслобак: либо через заливную горловину, либо в сливной болт. Необходимые сигналы от датчика поступают во входное устройство ЭВМ, где в совокупности с другой технической информацией происходит анализ химического состава масла.



Рис. 2. Общий вид мультимаслотестера

Выполнив все необходимее замеры на работающем компрессоре Atlas Copco, строим график зависимости количества частиц износа деталей компрессора от времени замеров (рис. 3). Основной график зависимости количества частиц износа деталей компрессора от моточасов приведен на рис. 4.

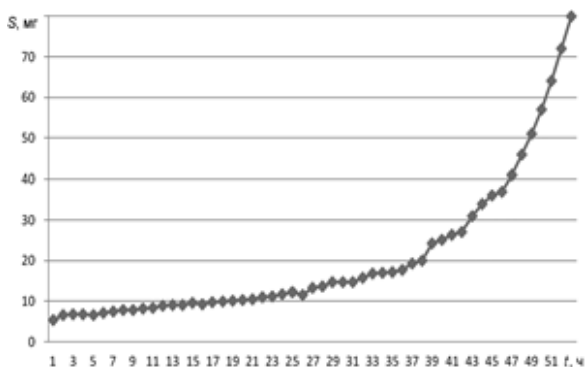


Рис. 3. График зависимости количества частиц износа  $S$  от времени работы  $t$

В ходе исследований контролировалось содержание воды в работающем масле. Так, при 15781 моточасах она составляла 0,2 %, а при 15813 моточасах – 0,3 %.

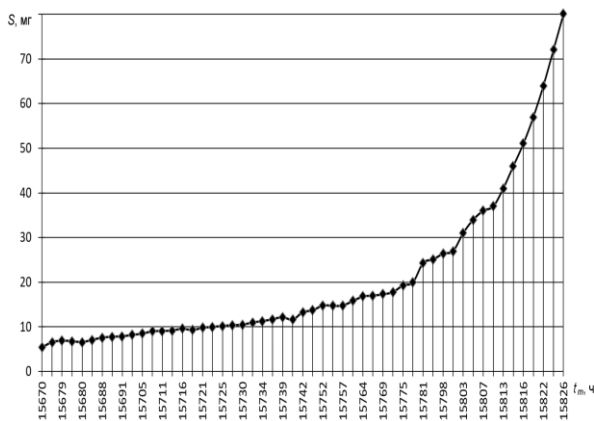


Рис. 4. Основной график зависимости количества частиц износа  $S$  от моточасов  $t_m$

Экспериментальные исследования проводились при различных температурах воздуха в диапазоне от 80 до 300 °С, поступающего в приемное устройство компрессора и влажности окружающей среды от 35 до 92 %.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как видно из графика зависимости количества частиц износа от количества замеров при различных температурах приемного воздуха компрессора, представленного на рис. 5, с понижением температуры воздуха немного замедляется рост количества частиц в масле. Это видно по замерам 1–2 и 4–5. При неизменности температуры воздуха количество частиц износа резко возрастает. Это видно на замере 5–6. При резком повышении температуры приемного воздуха рост количества частиц в масле опять замедляется. Это видно по замерам 6–7 и 7–8.

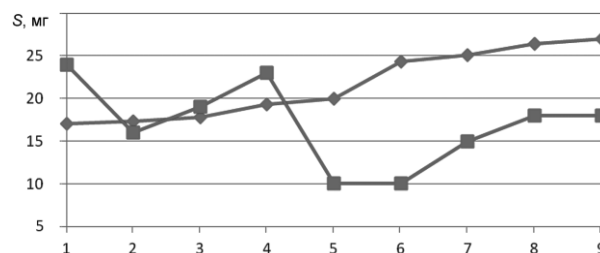


Рис. 5. Графики количества частиц износа от количества замеров (■ –  $T_{oc} = \text{const}$ ; ◆ –  $T_{oc} = \text{var}$ )

Исходя из этого можно предположить, что температура сжимаемого воздуха значительно влияет на содержание частиц в эксплуатируемом масле. Очевидно, это связано с воздействием температуры воздуха на работающие трущиеся детали рабочего механизма компрессора. И ясно видно, что любое изменение температуры воздуха, будь то повышение, либо ее снижение, влияет на снижение скорости содержания частиц в масле. А при постоянстве температуры скорость износа значительно возрастает.

Ориентировочно можно судить о следующей интегральной зависимости общего вида:

$$S = \int_a^b F(T) dT .$$

Функция  $F(T)$  – зависимость скорости изношенных частиц от температуры приемного воздуха, график которого представлен на рис. 6.

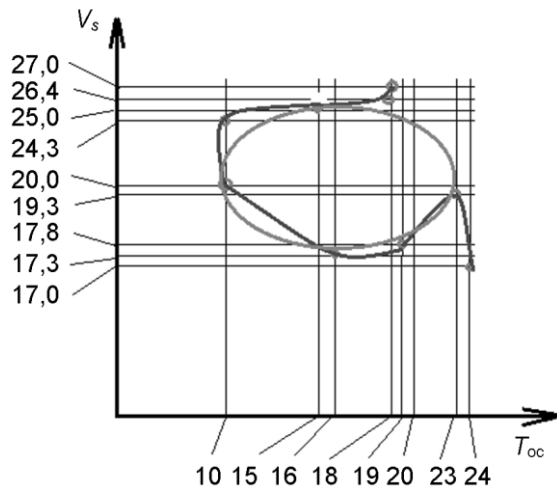


Рис. 6. Графики зависимости износа от температуры приемного воздуха

Если предположить такую гипотезу, что наша зависимость представляет собой замкнутый эллипс, то можно определить конкретную математическую зависимость скорости износа от температуры окружающего воздуха. И она, путем алгебраических преобразований, будет иметь следующий вид:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1;$$

$$\frac{T_{oc}^2}{14^2} + \frac{V_s^2}{5^2} = 1;$$

$$V_s = 5 \sqrt{1 - \frac{T_{oc}^2}{196}}.$$

В конечном итоге интегральная формула зависимости количества частиц от температуры окружающей среды будет иметь следующий вид:

$$S = 5 \int_{T_1}^{T_2} \sqrt{1 - \frac{T_{oc}^2}{196}} dT,$$

где  $T_{1,2}$  – температура окружающей среды на начало и конец замеров.

*Зависимость количества частиц износа от влажности окружающего воздуха.* Нами также была составлена зависимость содержания частиц износа деталей в масле от влажности окружающего воздуха (поступающего в приемное устройство компрессора

воздуха на сжатие). Общая формула искомой зависимости имеет следующий вид:

$$S = f(\varphi),$$

где  $S$  – общее количество частиц износа в масле, мг;  $\varphi$  – влажность приемного воздуха, %.

График изучаемой зависимости представлен на рис. 7.

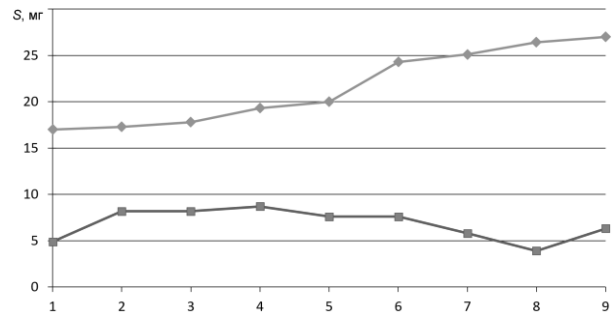


Рис. 7. Графики количества частиц износа от замеров при различной влажности приемного воздуха (■ –  $\varphi = \text{var}$ ; ♦ –  $\varphi = \text{const}$ )

По графику можно сделать следующие выводы:

1. При увеличении влажности сжимаемого воздуха, скорость роста изношенных частиц замедляется. Это видно по замерам 1–2 и 8–9.
2. При постоянстве влажности воздуха, скорость частиц в масле значительно возрастает. Это видно по замеру 5–6.
3. При понижении влажности, скорость роста количества частиц также снижается. Это видно по замерам: 4–5, 6–7 и 7–8.

Исходя из этого, можно судить о том, что влажность отбираемого компрессором воздуха имеет некие воздействия на количество изношенных частиц металла в работающем масле. Очевидно, что при постоянстве влажности износу частиц ничто не мешает, и износ резко увеличивается. Вероятно, при неизменности этого фактора в процессах трения создаются некие благоприятные условия для увеличения износа деталей машин. Ничего этому устоявшемуся процессу не мешает. При изменениях же влажности воздуха (увеличение или снижение) вероятно в трибологических процессах происходят какие-то химические либо физические явления, препятствующие износу трущихся деталей.

Данное предположение можно оценить с помощью следующей зависимости общего вида:

$$S = \int_a^b F(\varphi) d\varphi.$$

Функция  $F(\varphi)$  – зависимость скорости изношенных частиц от влажности приемного воздуха, график которого представлен на рис. 8.

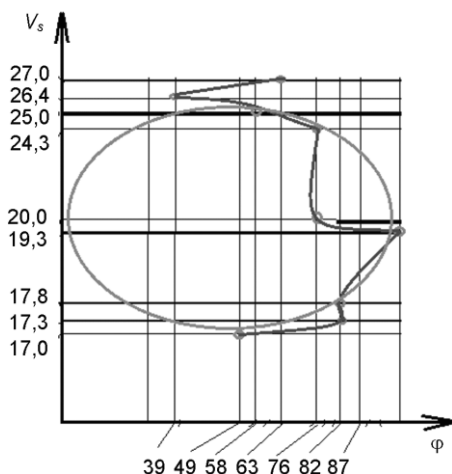


Рис. 8. Графики зависимости скорости износа от влажности окружающей среды

Опираясь на данный график, можно установить математическую зависимость скорости износа частиц от влажности приемного воздуха. После алгебраических преобразований он будет иметь следующий вид:

$$(x-a)^2 + (x-b)^2 = R^2;$$

$$(\varphi - 40)^2 + (V_s - 21,5)^2 = 30,14^2;$$

$$V_s = \sqrt{30,14^2 - (\varphi - 40)^2} + 21,5.$$

Таким образом, интегральная формула зависимости количества частиц износа от влажности окружающей среды будет иметь вид:

$$S = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \left[ \sqrt{30,14^2 - (\varphi - 40)^2} + 21,5 \right] d\varphi,$$

где  $\varphi_{1,2}$  – влажность окружающей среды на начало и конец замеров.

Полученные данные зависимости дают возможность для обширных исследований не только на производстве, но и непосредственно на заводе-изготовителе при изготовлении оборудования, мехатронных станочных систем, агрегатов и их комплектующих.

## ВЫВОДЫ

Из рис. 4 мы видим, что скорость износа резко увеличилась при 15781 и 15813 часах. Анализ содержания воды в компрессорном масле на эти моточасы 0,2 и 0,3 % соответственно. Присутствующая в масле вода резко понизила работоспособность масла из-за гидролиза содержащихся присадок. Мы также обнаружили, что воздействие таких внешних факторов, как температура и влажность окружающего воздуха, может значительно влиять на износ оборудования в целом. Установив эти закономерности, можно в конечном итоге влиять не на паразитические процессы трения, возникаемые в оборудовании, но использовать косвенный метод. А именно: путем планомерного изменения температуры окружающего воздуха и его влажности можно добиться значительного уменьшения износа трущихся поверхностей деталей машин. Контроль скорости износа узлов трения оборудования позволяет на ранней стадии выявить и устранить причины повышенного износа. Это в конечном итоге скажется на уменьшении стоимости технического обслуживания оборудования и эффективном снижении себестоимости выпускаемой данным оборудованием конечной продукции.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Топлива**, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение: справочное издание / К. Н. Будыштова, Л. А. Берштант, Ш. К. Богданов и др.; под ред. В. М. Школьников. Химия. 1989. С. 108–139. [ K. N. Bodeshtova, L. A. Bershtadt, S. K. Bogdano et. al., *Fuel, lubricants, technical liquids. Assortment and application*, (in Russian). Reference book, Himia, 1989. ]
2. **Салахов Т. З., Мигранов М. Ш., Нигматуллин Р. Г.** Экономический расчет эффективности внедрения системы анализа технических масел в производство // Журнал КШП ОМД № 7. 2017. С. 38–41. [ T. Z. Salakhov, M. Sh. Migranov, R. G. Nigmatullin, "Economic efficiency analysis implementation of technical oils in the production", (in Russian), in *KSHP OMD* № 7, pp. 38-41, 2017. ]
3. **Zadorognaya E., Levanov I., Oskina O.** Study of HTHS Viscosity of modern Motor Oils (2016) *Procedia Engineering*, 150, pp. 602–606. [ E. Zadorognaya, I. Levanov, O. Oskina, *Study of HTHS Viscosity of modern Motor Oils*, (in Russian), *Procedia Engineering*, 150, pp. 602-606, 2016. ]
4. **Смазочные материалы** в машинах и при лезвийной обработке резанием / Н. К. Криони и др. М.: Издательство «Инновационное машиностроение», 2018. 222 с. [ N. K. Krioni, et. al., *Lubricants and their application in machi-*

nes and with the forming surfaces in mechatronic machine-tool systems, (in Russian), Moscow: "Innovasionnoe mashinostroenie", 2018. ]

5. **Гаевик Д. Т.** Справочник смазчика. М.: Машиностроение, 1990. 352 с. [ D. T. Haevik, *Handbook of greaser*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1990. ]

6. Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин / В. Д. Зозуля и др. – Киев: Наукова думка, 1990. 258 с. [ V. D. Zozulya, et. al., *Dictionary – reference book on friction, wear and lubrication of machine parts*, (in Russian). Kiev: Naukova Dumka, 1990. ]

7. **Латышев В. Н.** Трибология резания. Кн. 2: Принципы создания эффективных СОТС / Иваново: Иван. гос. ун-т, 2009. 156 с. [ V. N. Latyshev, *Tribology of cutting. kN. 2: the Principles of creating effective STS*, (in Russian). Ivanovo: Ivan. Gos. un-t, 2009. ]

8. **Справочник** по триботехнике / Под общ. ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе. В 3 т. Т. 2. Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения. – М.: Машиностроение, 1990. 416 с. [ Under Ls. Ed. M. Hebdu, A. V. Chichinadze, *Handbook of tribotechnics / In 3 vol. 2. Lubricants, machinery lubricants, bearings of sliding and rolling*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1990. ]

#### ОБ АВТОРАХ

**МИГРАНОВ Марс Шарифуллович**, проф. зав. каф. ОКМиМ, дипл. инж.-мех. (1987, УАИ). Д-р техн. наук по процессам мех. и физ.-техн. обработки (защ. в РУДН, 2007). Иссл. в обл. триботехн., износостойкости режущего инструмента и повышения эффективности лезвийной обработки резанием.

**МИГРАНОВ Артур Марсович**, асп. каф. ОКМиМ. Дипл. магистр техники и технологии (РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина, 2017). Иссл. в обл. триботехнических параметров смазочных жидкостей.

**НИГМАТУЛЛИН Ришат Гаязович**, проф. каф. ОКМиМ, дипл. инж.-технол. (1974, УНИ). Иссл. в обл. химмотологии и триботехнических параметров смазочных жидкостей.

**САДЫКОВ Азамат Фиргатович**, асп. кафедры ОКМиМ. Дипл. специалист (УГНТУ, 2014). Иссл. в обл. триботехнических параметров смазочных жидкостей.

#### МЕТАДАТА

**Title:** Study of wear of friction screw compressor.

**Authors:** M. Sh. Migranov<sup>1</sup>, A. M. Migranov<sup>2</sup>,  
R. G. Nigmatullin<sup>3</sup>, A. F. Sadykov<sup>4</sup>

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup> migmars@mail.ru, <sup>2</sup> -migranov\_art\_1993@inbox.ru,  
<sup>3</sup> nigmatullin@himmotolog.ru,  
<sup>4</sup> sadykovazamat865@gmail.com.

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 23, no. 1 (83), pp. 27-33, 2019. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** The paper presents the results of experimental studies of the influence of external factors (temperature and humidity of the air entering the compressor receiving device) on the wear of the friction units of the screw compressor on the basis of the analysis of the physical and

chemical state of the lubricant during its operation in real time. It is shown that by systematically changing the ambient temperature and humidity can achieve a significant reduction in wear of friction surfaces of machine parts. With this approach, the diagnosis of friction units significantly reduces the cost of maintenance and repair; eliminates the possibility of premature replacement of a working unit with a new one.

**Key words:** lubricant; diagnostics; efficiency; wear; friction; particles out of the nose; the viscosity curve of wear; oil analysis; oil temperature; temperature of environ-housego air; humidity; costs.

**About authors:**

**МИГРАНОВ, Mars Sharifullovich**, professor, head of the department of bases of constructing of mechanisms and machines of USATU. Dipl. engineer-mechanic (UAI, 1987). Area of research in the field of tribology, the wear resistance of the cutting tool and improve the efficiency of the blade machining process

**МИГРАНОВ, Artur Marsovich**, postgraduate student of the sub-department "Bases of the designing of mechanism and machines" USATU. Mag.-ing. (Gubkin University, 2017). Area of research in tribotechnical parameters of lubricating fluids.

**НИГМАТУЛЛИН, Rishat Gayazovich**, professor of the department of bases of constructing of mechanisms and machines of USATU. Dipl. engineer-mechanic (1974, UPI). Research in the region of chemmotology and tribotechnical parameters of lubricating fluids.

**САДЫКОВ, Azamat Firgatovich**, postgraduate student of the sub-department "Bases of the designing of mechanism and machines" USATU. Engineer (USPTU, 2014). Area of research in tribotechnical parameters of lubricating fluids.