

DOI: 10.24143/2073-1574-2020-1-13-21  
УДК [621.431.74:621.436.038]:658.58

## АНАЛИЗ МАСЛА НА СОДЕРЖАНИЕ ПРОДУКТОВ ИЗНОСА КАК МЕТОД ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СУДОВОГО РЕДУКТОРА

*К. О. Сергеев*

*Мурманский государственный технический университет,  
Мурманск, Российская Федерация*

Рассматриваются результаты определения концентрации продуктов износа в масле редукторов судовых дизель-редукторных агрегатов промысловых судов с целью использования их для безразборной диагностики технического состояния. Отмечено, что конечная цель диагностики по продуктам износа складывается из выявления повышения скорости износа для принятия соответствующих мер и попытки прогнозирования возможной аварии. Приведена статистика за несколько лет контроля по нескольким типам редукторов (редуктор TKG2-0350 судов типа «Атлантик-335», редуктор SL2×3000 судов типа «Горизонт», редуктор судов типа «Атлантик-488», главный (типа «Киев») и раздаточный редуктор судов типа «Альпинист»). Представлена формула теоретического определения концентрации продуктов износа в смазочном масле, проиллюстрирована кривая изменения концентрации продуктов износа. Сделаны выводы об информативности и надежности использования концентрации продуктов износа как диагностического параметра для определения технического состояния редуктора. Приводятся основные причины низкой информативности метода определения продуктов износа в масле. Высокие концентрации отдельных металлов в продуктах износа в смазочном масле не обязательно подтверждают факт аварийного износа деталей редуктора. Прежде чем осуществлять разборку редуктора, приводящую к снижению его ресурсов, необходимо провести диагностику различными методами. Рекомендовано проводить анализ для обнаружения критических износов деталей редуктора не менее двух раз в год (каждые шесть месяцев работы). Предложены возможные способы совершенствования метода диагностики по продуктам износа в масле.

**Ключевые слова:** редуктор, дизель-редукторный агрегат, продукты износа, безразборная диагностика, диагностические параметры.

**Для цитирования:** *Сергеев К. О.* Анализ масла на содержание продуктов износа как метод диагностики технического состояния судового редуктора // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2020. № 1. С. 13–21. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-1-13-21.

### **Введение**

Редукторы дизель-редукторных агрегатов являются распространенными элементами судовых энергетических установок, они эксплуатируются как на промысловых рыболовных судах, так и на транспортных судах различного назначения. Редукторы предназначены для передачи крутящего момента на гребной винт и привода валогенераторов постоянного и переменного тока. Редукторы имеют различную конструкцию: с горизонтальным и вертикальным расположением валов, разные передаточные отношения, конструкции подшипников узлов с подшипниками качения и скольжения. Как у любого сложного механического агрегата, у редуктора необходимо систематически контролировать техническое состояние.

В настоящее время могут применяться самые разные методы безразборной диагностики технического состояния редуктора: вибродиагностика с различными диапазонами вибрационного сигнала и методами его обработки, термометрические методы с использованием тепловизоров и диагностика редуктора по продуктам износа в масле [1].

### **Материалы и методы исследования**

С диагностическими целями могут применяться различные методы количественного определения и анализа состава продуктов износа в масле. В целом, их можно разделить на две группы: определение химических элементов (металлов) в составе частиц износа и феррография – контроль размеров и вида частиц, определяемых видом износа [1, 2].

Первый метод основан на определении элементного состава и количества металлов в масле. Диагностическим параметром в этом случае является предельная концентрация частиц износа, а изнашиваемая деталь определяется по химическому составу металлов (например, наличие большого количества меди, цинка и свинца свидетельствует об износе подшипников) [2]. Учитывается и тренд изменения концентрации по времени.

При использовании первого метода применяется спектральный анализ масла в различных частотных диапазонах для видимого и для рентгеновского излучений.

Для проведения подобных анализов используются портативные спектроанализаторы, например, российские серии «Спектроскан» или аналогичные трибологической лаборатории MetallChek.

Во время работы в агрегат может доливаться масло, продукты износа постоянно удаляются из масла фильтрами. Теоретически концентрацию продуктов износа [2] возможно определять по формуле

$$K = K_0 e^{-\frac{At}{Q_0}} + \frac{g}{A} \left( 1 - e^{-\frac{At}{Q_0}} \right), \quad (1)$$

где  $K_0$  и  $K$  – начальная и текущая концентрации продуктов износа в смазочном масле, г/т;  $Q_0$  – емкость масляной системы;  $g$  – интенсивность поступления продуктов износа, г/ч;  $A = g_{\phi} + g_y$ , г/ч;  $t$  – время эксплуатации агрегата после долива масла, ч.

Разумно предположить, что зависимость (1) справедлива и для редукторов судовых дизель-редукторных агрегатов, в них также происходит динамическая стабилизация концентрации продуктов износа. Эта концентрация и может быть принята в качестве диагностического параметра. На рис. 1 приведена кривая изменения концентрации продуктов износа и влияние на нее добавок масла в систему.

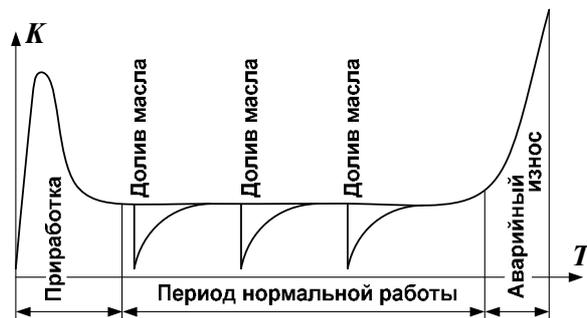


Рис. 1. Кривая изменения концентрации продуктов износа

В целом, цель диагностики по продуктам износа заключается в решении двух связанных задач: выявить повышение скорости износа для принятия соответствующих мер и попытаться прогнозировать возможную аварию.

Приведенные в настоящем исследовании результаты диагностики были получены при анализе масла на продукты износа на рентгеноспектральном анализаторе Барс 3.

Рассмотрим подробно методику исследования. Перед проведением анализа проба тщательно перемешивается на специальном стенде. Затем, перед анализом в приборе, масло фильтруется через бумажный фильтр. Фильтр просушивается, и проводится определение качественного и количественного состава металлов, входящих в продукты износа, выделенные на фильтре.

Анализатор позволяет определять содержание в продуктах износа железа, меди, свинца. Проводилось несколько измерений, и определялось среднее значение содержания металлов в пробе.

Отбор проб масла для процесса определения продуктов износа проводился перед очередными освидетельствованиями судна (перед ремонтом); кроме того, анализ на продукты износа проводился перед ежегодными освидетельствованиями (как часть анализа смазочного масла редуктора) и во всех случаях, когда масло из редуктора сдавалось в лабораторию для проведения стандартного физико-химического анализа.

Таким образом, с некоторым приближением можно считать, что указанное динамическое равновесие устанавливалось на момент отбора пробы из редуктора. Пробы отбирались с работающего редуктора в стандартную (0,5 л) бутылку.

Основная безразборная диагностика технического состояния редуктора перед ремонтом проводилась методами вибродиагностики с контролем технического состояния зубчатого зацепления по третьоктавному спектру и подшипников качения или скольжения по анализу огибающей высокочастотной компоненты сигнала [3].

В общей сложности комбинацией этих методов были проведены работы по диагностике на более чем ста различных судовых редукторах. В настоящей работе приведены результаты диагностики для редукторов, которые отслеживались в течение некоторого времени.

### Результаты исследования

Ниже приводятся результаты определения металлов в продуктах износа в масле для различных типов редукторов.

Редуктор ТКГ2-0350 судов типа «Атлантик-333». Редуктор передает крутящий момент от двух главных двигателей на гребной винт и два валогенератора: переменного и постоянного тока. Редуктор имеет четыре подшипниковых узла с подшипниками качения и шесть с подшипниками скольжения.

Результаты определения концентрации железа и меди в смазочном масле редуктора приведены на рис. 2.

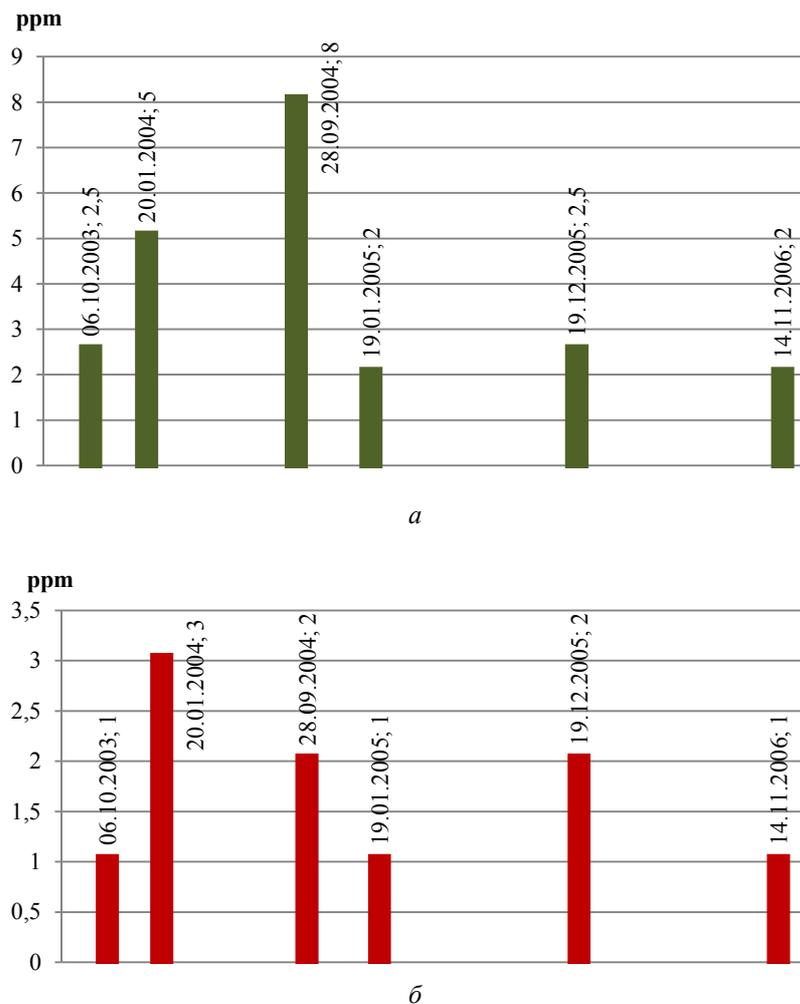


Рис. 2. Результаты определения концентрации: а – железа; б – меди в продуктах износа для редуктора ТКГ2-0350

Редуктор SL2×3000 судов типа «Горизонт». Редуктор передает крутящий момент от двух главных двигателей на гребной винт и два валогенератора переменного тока. Редуктор имеет четыре подшипниковых узла с подшипниками качения и шесть с подшипниками скольжения. Результаты определения концентрации железа и меди в смазочном масле редуктора приведены на рис. 3.

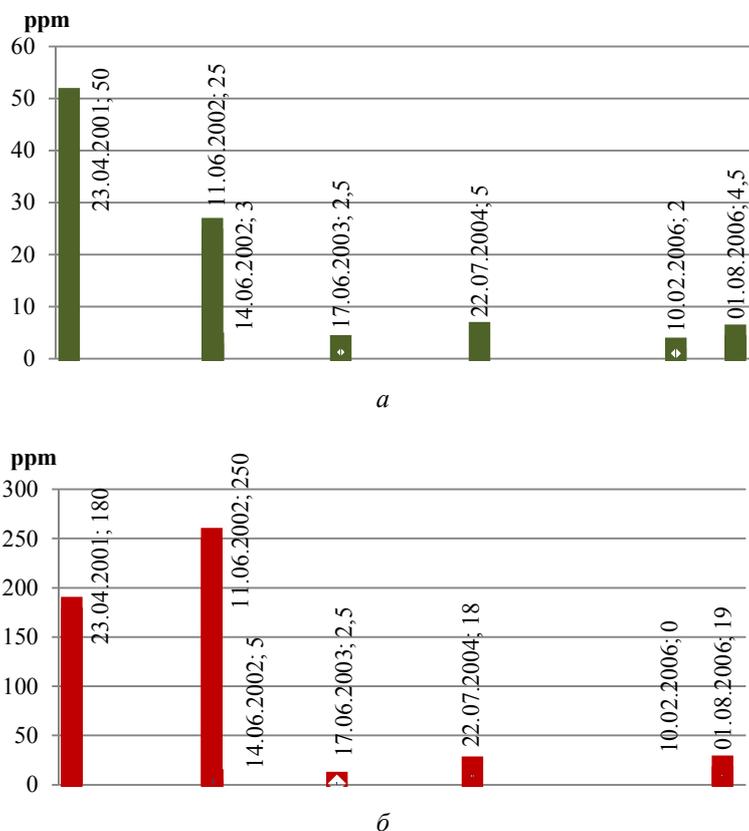


Рис. 3. Результаты определения концентрации: а – железа; б – меди в продуктах износа для редуктора SL2×3000

Редуктор судов типа «Атлантик-488». Редуктор передает крутящий момент от двух главных двигателей на гребной винт и два валогенератора переменного тока. Редуктор имеет десять подшипниковых узлов с подшипниками качения и два с подшипниками скольжения. Результаты определения концентрации железа и меди в смазочном масле редуктора приведены на рис. 4.

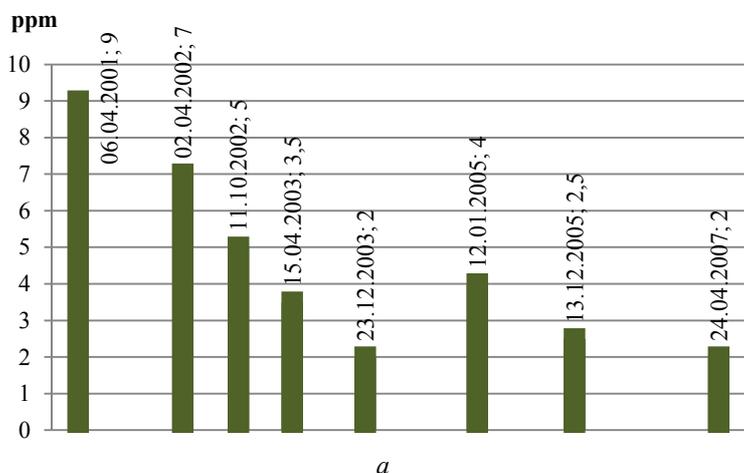


Рис. 4. Результаты определения концентрации: а – железа в продуктах износа для редуктора судов типа «Атлантик-488»

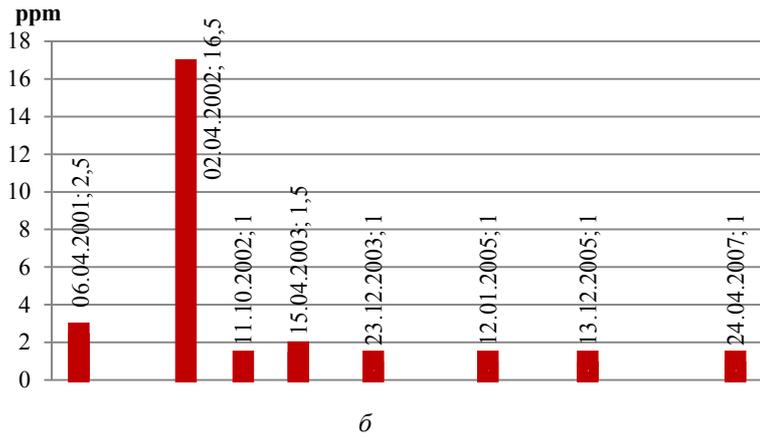


Рис. 4. Окончание. Результаты определения концентрации:  
 б – меди в продуктах износа для редуктора судов типа «Атлантик-488»

Главный редуктор (типа «Киев») судов типа «Альпинист». Редуктор передает крутящий момент от главного двигателя на гребной винт и раздаточный редуктор. Редуктор имеет два подшипниковых узла с подшипниками качения и восемь с подшипниками скольжения. Результаты определения концентрации железа и меди в смазочном масле редуктора приведены на рис. 5.

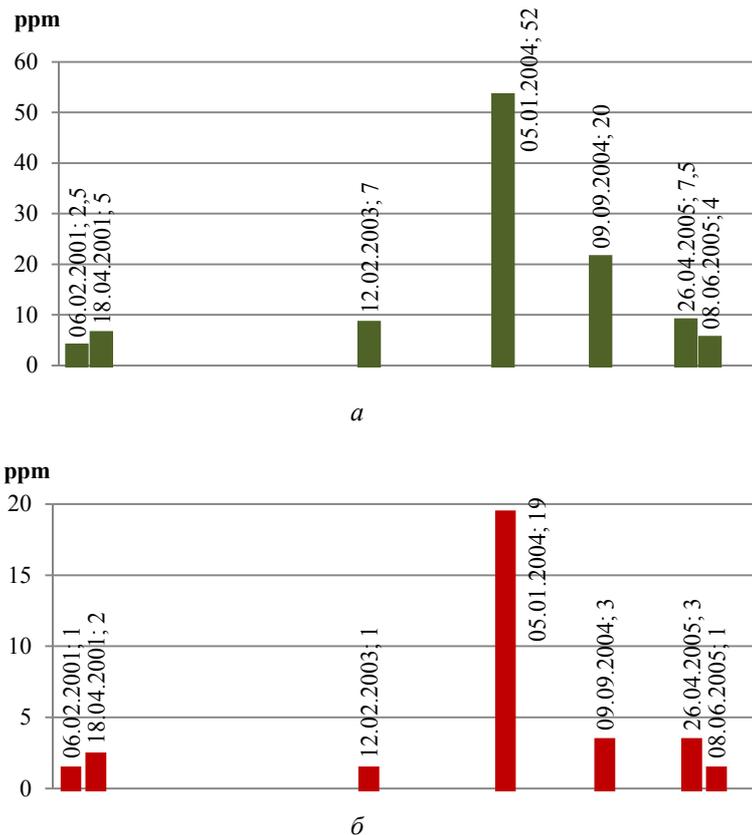


Рис. 5. Результаты определения концентрации: а – железа; б – меди  
 в продуктах износа для главного редуктора типа «Киев»

Раздаточный редуктор судов типа «Альпинист». Редуктор используется для привода генераторов переменного и постоянного тока. Редуктор имеет четыре вала и восемь подшипниковых узлов с подшипниками качения. Результаты определения концентрации железа и меди в смазочном масле редуктора приведены на рис. 6.

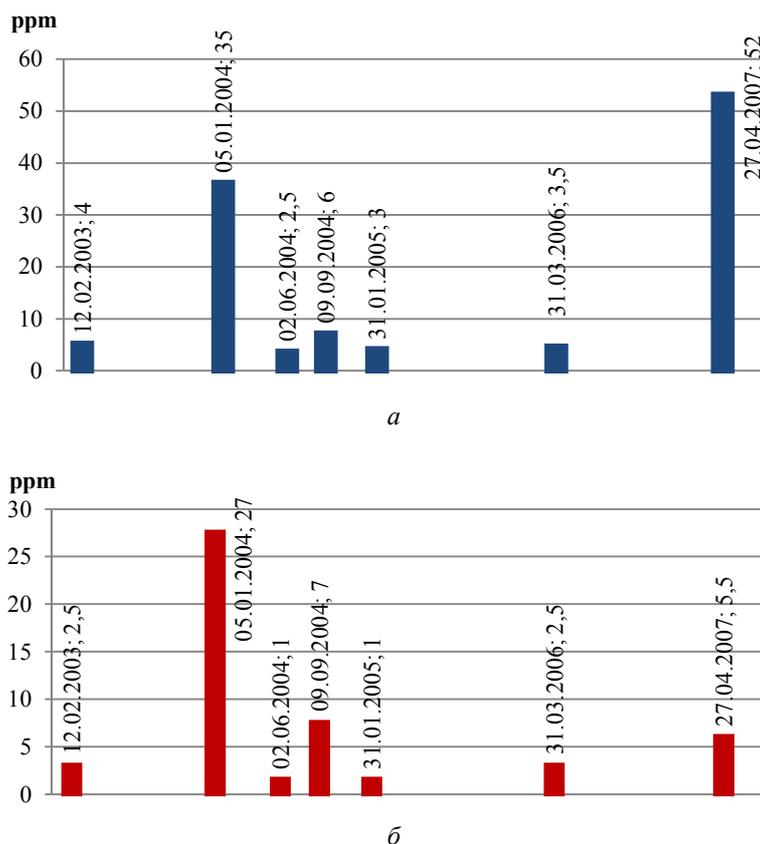


Рис. 6. Результаты определения концентрации: *a* – железа; *б* – меди в продуктах износа для раздаточного редуктора судов типа «Альпинист»

Анализ результатов замеров содержания продуктов износа в масле редукторов подтверждает корреляцию между значениями содержания железа и меди в продуктах износа, что свидетельствует о корректном отражении процессов износа в деталях редуктора рассматриваемым методом.

Результаты замеров по содержанию продуктов износа имеют большой разброс, и большие значения содержания железа и меди не обязательно отражают повышенный, а тем более аварийный, износ деталей редуктора. Как правило, большие значения концентрации отмечаются при значительных наработках масла и накоплении продуктов из-за неудовлетворительной работы системы фильтрации масла. Так, на редукторе SL2×3000 отмечаются большие значения (см. рис. 3). Проведенная вибродиагностика редуктора и осмотр зубчатых колес подтвердили, что имеет место нормальный износ зацепления. Дефекты подшипников отсутствуют.

После замены части масла уровни содержания металлов снизились. Но система смазки не была промыта, в результате чего замер, проведенный через год, снова выявил высокое содержание железа и меди. После промывки системы концентрация продуктов износа стабилизировалась на низком уровне. При этом никаких ремонтных работ на редукторе не проводилось.

Аналогичные результаты видны на редукторе судна типа «Атлантик-488», где после очистки масла упала концентрация железа и меди.

Метод, тем не менее, может доказывать и большую результативность. Так, на одном из главных редукторов (типа «Киев») судов типа «Альпинист» была проведена замена валшестерни ведомого вала ступени передачи на раздаточный редуктор с нарушением технологии замены. В результате нештатной приработки зацепления концентрация железа выросла почти в 6 раз, а меди – еще больше (см. рис. 5, б).

После приработки концентрация стабилизировалась. С другой стороны, необходимо отметить, что даже после окончания приработки неудовлетворительная работа ступени легко определялась по спектру вибросигнала.

К получению ошибочных результатов может привести некорректный отбор пробы масла. Так, на одном из раздаточных редукторов судна типа «Альпинист» (см. рис. 6) проба отбиралась

с нижней части корпуса (через сливную пробку) остановленного редуктора. В результате была получена запредельная концентрация железа при совершенно нормальном уровне содержания меди. Подобный результат объясняется тем, что с нижней точки редуктора была отобрана железная стружка, которая из-за больших размеров не отфильтровывалась фильтром. Проведенный контроль вибрации не выявил дефектов зацепления или подшипников качения.

Еще одной проблемой применения метода диагностики по продуктам износа является сложность нормирования критического содержания металлов и установки уровня «тревога». Статистический анализ результатов при нормальной работе подшипников и зацепления редуктора свидетельствует, что, как правило, результаты замеров после стабилизации процесса в масле не имеют значимых различий.

Для примера приведем расчет для редуктора SL2×3000, выполненный для замеров, осуществленных после очистки системы.

Расчет [4] производится по формуле

$$\frac{y - \bar{y}}{s} \geq t,$$

где  $s$  – дисперсия;  $t$  – критерий Стьюдента;  $\bar{y}$  – среднее арифметическое;  $y$  – конкретное значение.

Вероятно, можно использовать и другую формулу из статистического анализа [4] (считая, что концентрация при повышенном износе может быть у замера, не принадлежащего данной выборке):

$$t = \frac{y_1 - y_2}{s \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}, \quad (2)$$

где  $n_1$  – количество наблюдений в первом замере;  $n_2$  – количество наблюдений во втором замере;  $y_1$  – среднее арифметическое;  $y_2$  – конкретное значение.

Подставляя в формулу (2) конкретные значения, вычислим критерий Стьюдента для определения значимости полученных результатов с точки зрения статистического анализа:

$$t = \frac{5 - 2,5}{1 \sqrt{\frac{1}{3} + \frac{1}{3}}} = 3,7.$$

Полученное в результате расчета значение критерия  $t$  доказывает, что даже максимальное для выборки значение концентрации продуктов износа не имеет значимых отличий.

### Выводы

1. Диагностика по контролю концентрации металлов в продуктах износа, накопленных в смазочном масле, отражает процессы износа, происходящие в редукторе.

2. Значительные концентрации отдельных металлов не всегда свидетельствуют о наличии аварийного износа в деталях редуктора.

3. Неправильно отобранная проба масла (например, с остановленного редуктора или с корпуса фильтра, с непромытой отборной трубки) может очень существенно исказить результаты анализа продуктов износа и привести либо к завышенным, либо заниженным значениям.

4. На значения концентрации крайне высокое влияние оказывает работа системы фильтрации масла, которая у большинства обследованных редукторов не является эффективной, что приводит к накоплению продуктов износа и не дает возможности определить наступления критической для деталей редуктора скорости износа.

5. Для обнаружения критических износов деталей редуктора анализ должен проводиться не реже чем через шесть месяцев работы, а желательно и чаще.

6. Более точные результаты, очевидно, будет давать метод феррографии, мало зависящий от абсолютной концентрации продуктов износа и реагирующий на возникновение аварийных износов даже при малых концентрациях металлов в масле.

7. Принимать решение о наличии повышенного износа желательно на основе статистического анализа результатов замеров.

8. При получении критичных значений концентрации продуктов износа в масле необходимо провести диагностику другими методами, чтобы не проводить необоснованную разборку редуктора, неизбежно снижающую его ресурс.

9. Метод диагностики по продуктам износа в масле для судовых редукторов вряд ли можно признать самостоятельным методом, скорее – дополнительным к методам вибродиагностики.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Scheffer C., Girdhar P. Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance. Copyright, IDC Technologies, 2004. 252 p.
2. Равин А. А. Сравнительный анализ диагностических возможностей методов мониторинга продуктов износа в масле // Трибология и надежность: сб. науч. тр. XI Междунар. науч. конф. (Санкт-Петербург, 27–29 октября 2011 г.). СПб.: Изд-во ПГУПС, 2011. С. 274–282.
3. Жуков А. С., Сергеев К. О. Проблемы перевода редукторов дизель-редукторных агрегатов на ремонт по состоянию // Эксплуатация мор. трансп. 2012. № 4 (7). С. 45–50.
4. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 279 с.

Статья поступила в редакцию 01.10.2019

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

*Сергеев Константин Олегович* – Россия, 183010, Мурманск; Мурманский государственный технический университет; канд. техн. наук, доцент; доцент кафедры судовых энергетических установок; keprstr@rambler.ru.



### TESTING OIL FOR WEAR PRODUCTS PRESENCE AS DIAGNOSTIC METHOD OF OPERATIONAL STATE OF MARINE GEARBOX UNIT

*K. O. Sergeev*

*Murmansk State Technical University,  
Murmansk, Russian Federation*

**Abstract.** The article discusses the results of determining the concentration of wear products in oil of marine diesel gearbox units on fishing vessels in order to use them for in-place diagnostics without dismantling. It was stated that the ultimate goal of diagnostics of wear products consists of identifying the increased wear rate, taking appropriate measures and predicting a possible accident. There has been brought the statistics for several years of monitoring different gearbox types: TKG2-0350 unit of Atlantic-335 type ships, SL2×3000 unit of Horizont type ships, gearbox of Atlantic-488 type ship, main gearbox of Kiev type ship, gearbox of Alpinist type ship. A formula for theoretical determination of the wear product concentration in lubricating oil is given, and a curve of the changing concentration of wear products has been illustrated. Conclusions are made about the information content and reliability of using the wear product concentration as a diagnostic parameter to determine the technical condition of the gearbox. The main reasons for the low information content of the method for determining the wear products in oil are provided. High metal concentrations in wear products in lubricating oil do not necessarily confirm the fact of accidental wear of gearbox parts. Instead of disassembling the gearbox, which leads to decreasing its resources, it is necessary to carry out diagnostics using various methods. It is recommended to analyze the wear degree of gearbox parts at least twice a year (after every six months of operation). There have been offered the reliable ways for improving the wear product diagnostic method.

**Key words:** gearbox, diesel gear unit, wear products, in-place diagnostics, diagnostic parameters.

**For citation:** Sergeev K. O. Testing oil for wear products presence as diagnostic method of operational state of marine gearbox unit. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2020;1:13-21. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-1574-2020-1-13-21.

*REFERENCES*

1. Scheffer C., Girdhar P. *Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance*. Copyright, IDC Technologies, 2004. 252 p.
2. Ravin A. A. Sravnitel'nyj analiz diagnosticheskikh vozmozhnostej metodov monitoringa produktov iznosa v masle [Comparative analysis of diagnostic capabilities of methods for monitoring wear products in oil]. *Tribologiya i nadezhnost': sbornik nauchnyh trudov XI Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii (Sankt-Peterburg, 27–29 oktyabrya 2011 g.)*. Saint-Petersburg, Izd-vo PGUPS, 2011. Pp. 274-282.
3. Zhukov A. S., Sergeev K. O. Problemy perevoda reduktorov dizel'-reduktornyh agregatov na remont po sostoyaniyu [Problems of repair of gearboxes of diesel gear units]. *Ekspluatatsiya morskogo transporta*, 2012, no. 4 (7), pp. 45-50.
4. Adler Yu. P., Markova E. V., Granovskij Yu. V. *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nyh uslovij* [Planning experiment to find optimal conditions]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 279 p.

The article submitted to the editors 01.10.2019

***INFORMATION ABOUT THE AUTHOR***

***Sergeev Konstantin Olegovich*** – Russia, 183010, Murmansk; Murmansk State Technical University; Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Marine Power Plants; keptr@rambler.ru.

