

- DELPHI)”, Vestnik DGTU, Sbornik nauchnyx trudov Dneprodzerzhinsk DGTU.
5. Sivokobylenko, V. F., Vasilets, S. V. (2014) “Design and experimental definition parameters of substitution diagrams and characteristics asynchronous motors”, Naukoviy visnik NGU. № 5, pp. 76–82
  6. Kazakov, Yu.B., and N.K. Shvetsov. “Calculating analysis of steel losses in induction motors fed by frequency converters with non-sinusoidal output voltage.” Vestnik IGEU 5 (2015): 42–46. DOI: 10.17588/2072-2672.2015.5.042-046
  7. Baranov, M.V., and O.A. Korchagin. “High torque synchronous motor mathematical model development under the design of precision drives.” Engineering Journal: Science and Innovation 8(20) (2013): 23.
  8. Venikov V. A. The theory of similarity and modeling (in relation to the tasks of the electric power industry): textbook. allowance for electricity special. universities / V.A. Venikov, G.V. Venikov. - M.: Electrical Engineering, 2013. -- 440 s
  9. Steklov A. S. Prediction of the technical condition of ship electric power systems / A. S. Steklov, A. V. Serebryakov, V. G. Titov // Bulletin of Ivanovo State Power Engineering University. - 2016. - No. 5. - P. 21–26. DOI: 10.17588 / 2072-2672.2016.5.021-026.
  10. Cherny S. G. Modeling of process control in complex systems with non-deterministic disturbing influences / S. G. Cherny, A. A. Zhilenkov // Automation of control processes. - 2016. - No. 1 (43). - P. 37–46.
  11. Steklov A. S. Development of a model of an expert system for diagnosing and predicting the technical condition of ship electric power systems / A. S. Steklov, A. V. Serebryakov, V. G. Titov // Electrical: electronic scientific journal online. - 2016. - T. 3. - No. 2. - S. 24–27.
  12. Karakaev A.B. Razrabotka metodologii, metodov i modelej analiza vliyaniya razlichnykh variantov postroeniya struktury i rezhimov podderzhaniya i vosstanovleniya rabotosposobnosti sudovykh elektroenergeticheskikh sistem (chast' 1) [tekst] / A.B. Karakaev, A.V. Lukanin, E.V. Hekert // Ekspluatatsiya morskogo transporta. 2016. № 3 (80). S. 54–60.
  13. Karakaev A.B. Razrabotka metodologii, metodov i modelej analiza vliyaniya razlichnykh variantov postroeniya struktury i rezhimov podderzhaniya i vosstanovleniya rabotosposobnosti sudovykh elektroenergeticheskikh sistem (CHast' 2) [Tekst] /A.B. Karakaev, A.V. Lukanin, E.V. Hekert//Ekspluatatsiya morskogo transporta. 2016. № 4 (81). S. 85-95.
  14. Karakaev A.B. Osnovnye principy modelirovaniya i informacionnoj podderzhki processov upravleniya ekspluatatsiej sudovykh elektroenergeticheskikh sistem. (CHast' 1) [Tekst] /A.B. Karakaev, A.V. Lukanin, E.V. Hekert//Ekspluatatsiya morskogo transporta. 2017. № 2 (83). S. 114-122.
  15. Karakaev A.B. Osnovnye principy modelirovaniya i informacionnoj podderzhki processov upravleniya ekspluatatsiej sudovykh elektroenergeticheskikh sistem. (CHast' 1) [Tekst] /A.B. Karakaev, A.V. Lukanin, E.V. Hekert//Ekspluatatsiya morskogo transporta. 2017. № 3 (84). S. 89-99.

УДК 629.5.015

DOI: 10.34046/aumsuomt95/14

## ИЗНОСЫ ПАР ТРЕНИЯ В СУДОВЫХ ДИЗЕЛЯХ С ЭЛЕКТРОННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

*С.А. Худяков, доктор технических наук, профессор*

*А.И. Епихин, кандидат технических наук*

*А.В. Игнатенко*

Опыт эксплуатации судовых малооборотных дизелей с электронным управлением свидетельствует о том, что со временем появляются повреждения и отказы, связанные с естественными износами пар трения, особенно прецизионных, в силовой гидравлической системе. Это приводит к снижению давления в системе и некоторым нарушениям газораспределения, что отражается на эксплуатационных характеристиках и снижении эффективности работы МОД. Этот же эффект будет более значителен на МОД серии Win GD фирмы Wartsila-Sulzer, у которых давление в силовой гидравлической системе не 200, а 300 бар. Утечки в таких системах при аналогичных износах в парах трения будут больше. Влияние повреждений и отказов элементов электронных систем на техническое состояние дизелей количественно оценить затруднительно и прогнозировать эти события тоже. Если для основных деталей МОД фирмы дают значения ресурсов, то для плат, микросхем и т. п. этих сведений нет. К тому же, в большинстве случаев эта продукция не фирм дизелестроителей. Таким образом, анализируя состояние дизелей с электронным управлением возможно только рекомендовать способы восстановления изношенных пар трения или их замену, что облегчит задачу судовладельцев по поддержанию судов с эксплуатационными характеристиками близкими к номинальным.

**Ключевые слова:** малооборотные дизели, электронное управление, эксплуатация, проблемы, повреждения, отказы.

The operating experience of electronically controlled marine low-speed diesel engines indicates that over time, damage and failure occur due to the natural wear of friction pairs, especially precision ones, in a power hydraulic system. This leads to a decrease in pressure in the system and some gas distribution disturbances, which affects the operational characteristics and a decrease in the efficiency of the MOD operation. The same effect will be more significant for the Wartsila-Sulzer Win GD MOD series, in which the pressure in the power hydraulic system is not 200, but 300 bar. Leaks in such systems with similar wear in friction pairs will be greater. It is difficult to quantify the impact of damage and failure of electronic systems on the technical condition of diesel engines and predict these events, too. If firms give resource values for the main details of the MOD, then for the boards, microcircuits, etc., this information is not available. In addition, in most cases, these products are not firms of diesel builders. Thus, analyzing the condition of electronically controlled diesel engines, it is only possible to recommend methods for restoring worn friction pairs or replacing them, which will facilitate the task of shipowners in maintaining ships with operational characteristics close to nominal.

**Keywords:** low-speed diesel engines, electronic control, operation, problems, damage, failures.

В процессе эксплуатации судовых малооборотных дизелей с электронным управлением (МОД ЭУ) наблюдаются износы прецизионных пар трения. К этим парам трения относятся элементы силовой гидравлической системы (СГС): приводы топливных насосов высокого давления (ТНВД, рисунок 1) и выпускных клапанов (рисунок 2), сами насосы СГС (рисунок 3, на рисунке 3а – принцип работы насоса), а также многочисленные золотники и электромагнитные клапаны, входящие в гидравлические блоки МОД серии ME фирмы MAN B&W, RT-flex и Win GD фирмы Wartsila-Sulzer [1,2]. Несмотря на то, что фирмы, например, MAN B&W, дают достаточно длительные ресурсы на элементы СГС – до 32 тыс. часов, повреждения пар трения, связанные с износами, наступают значительно раньше, особенно золотников (рисунок 4), вызывая определённые проблемы. Всё это приводит к падению давления в

СГС и, несомненно, отражается на параметрах МОД [5,6,7]. В частности, снижению давления впрыска топлива и более позднему открытию, и закрытию выпускных клапанов (рисунок 6). При этом происходят незначительные фазовые изменения в газораспределении, т. е. уменьшается угол опережения подачи топлива и увеличивается угол начала открытия выпускных клапанов.

По существу, фазовые изменения в газораспределении возможны и по другим причинам. Например, в двигателях фирмы Wartsila-Sulzer, у которых привод тахо-системы (рисунок 5) осуществляется зубчатыми ремнями, имеющими определённую податливость и вытяжку – основную причину необходимости замены ремней по рекомендации фирмы через 2-3 года эксплуатации [1].

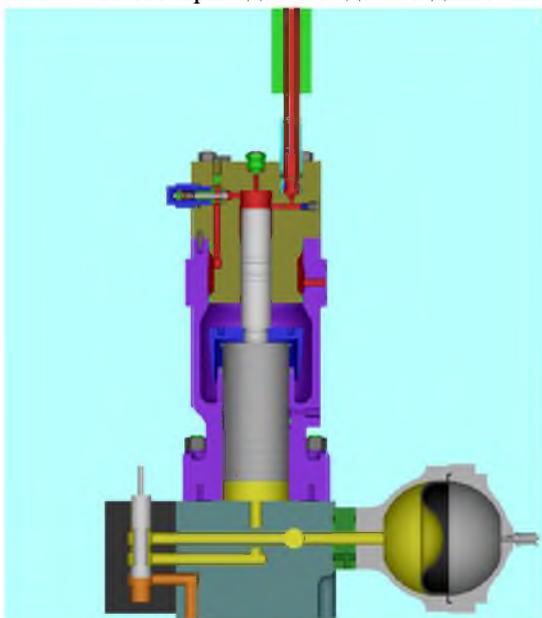


Рисунок 1 – Гидравлический привод ТНВД МОД серии ME (прецизионные пары: плунжер топлива, плунжер масла СГС и золотник управления)

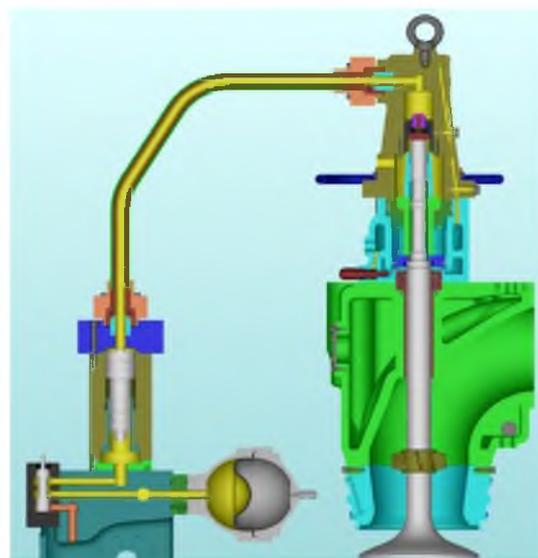


Рисунок 2 – Гидравлический привод выпускного клапана МОД серии ME (прецизионные пары: плунжер СГС, плунжер масла гидравлического привода клапана, золотник управления, плунжер штока клапана с демпфером)

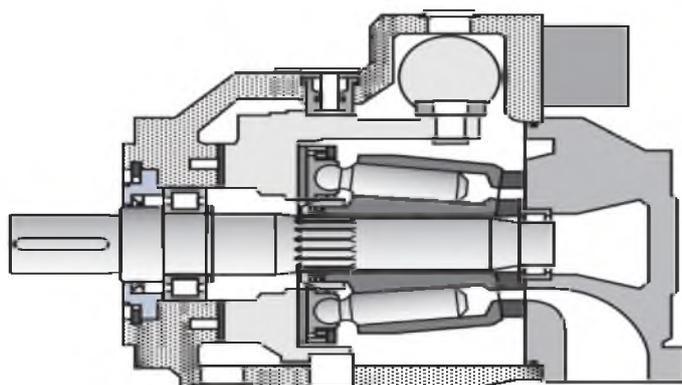


Рисунок 3 – Схема осевого поршневого насоса СГС МОД серии ME (прецизионные пары: плунжеры насоса)

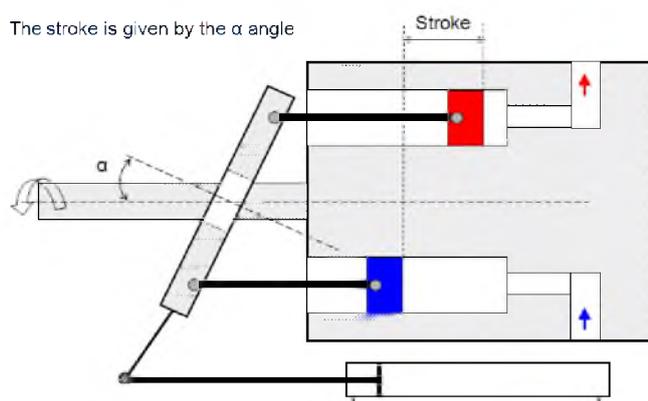


Рисунок 3.а – Схема принципа работы плунжерного насоса СГС с изменением хода плунжеров в зависимости от угла  $\alpha$  (наклона шайбы)

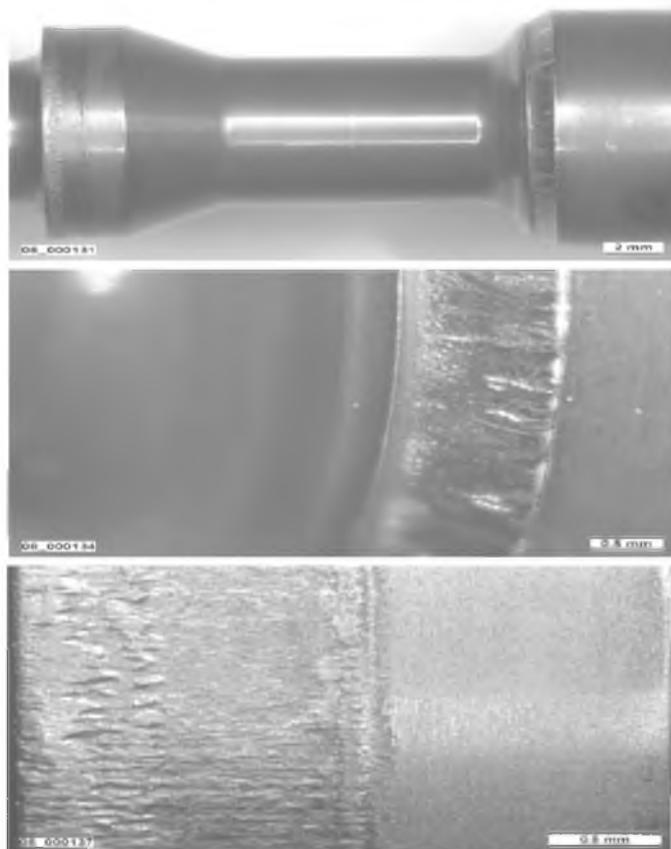


Рисунок 4 – Изношенный золотник клапана контроля впрыска (ICV) МОД серии RT-flex (сверху – общий вид, увеличено: в центре – конический участок справа, внизу – цилиндрическая часть слева с участком поверхности, разрушенным от кавитации)

В данной работе авторы не анализируют влияние крутильных колебаний (КК) валопровода, особенно при наличии резонансов, на фазы газораспределения в околорезонансных зонах, где углы скручивания коленчатого вала (его носового торца, где размещена тахо-система) могут достигать несколько градусов.

Подобный случай наблюдается на танкерогазовозе «Navigator Prominence» с главным МОД типа 7S50ME-C8.2-GI, что вызывает повышенный уровень вибрации остова дизеля (по субъективным оценкам). При этом резонанс КК находится на частотах вращения  $n_6 = 53 \pm 16 \text{ мин}^{-1}$  (порядок колебаний  $\nu = 6$ ) и  $n_4 = 80 \pm 24 \text{ мин}^{-1}$  ( $\nu=4$ ), а спецификационные режимы: МХ – 60 и СХ – 76  $\text{мин}^{-1}$ , т. е. оба режима входят в околорезонансные зоны.

На рассматриваемом судне валопровод без демпфера КК, что существенно ухудшает условия эксплуатации гребной установки [7, 8].

Точное соблюдение фаз газораспределения во всех МОД с ЭУ является основным их преимуществом перед машинами с механическим приводом. Электронное управление газораспределением даёт возможность изменять фазы, особенно углы опережения подачи топлива, чем достигается снижение удельного расхода топлива на парциальных режимах эксплуатации [2, 3, 5]. Поэтому при эксплуатации МОД с ЭУ следует тщательно анализировать состояние всех элементов СГС (с точки зрения износов) и уровня давления в системе независимо от его номинального значения 200 или 300 бар.



Рисунок 5 – Ремни тахо-системы МОД серии RT-flex (замена через 2-3 года)

Что касается электронных систем управления (ECS) фирм MAN B&W: Multi Purpose Controller (MPC) и фирмы Wartsila-Sulzer: Wartsila Engine Control System (WECS), то введение в их

структуру отдельных блоков, учитывающих износы в механических элементах (это повреждения, а не отказы) возможно, но не рационально с точки зрения ряда факторов.

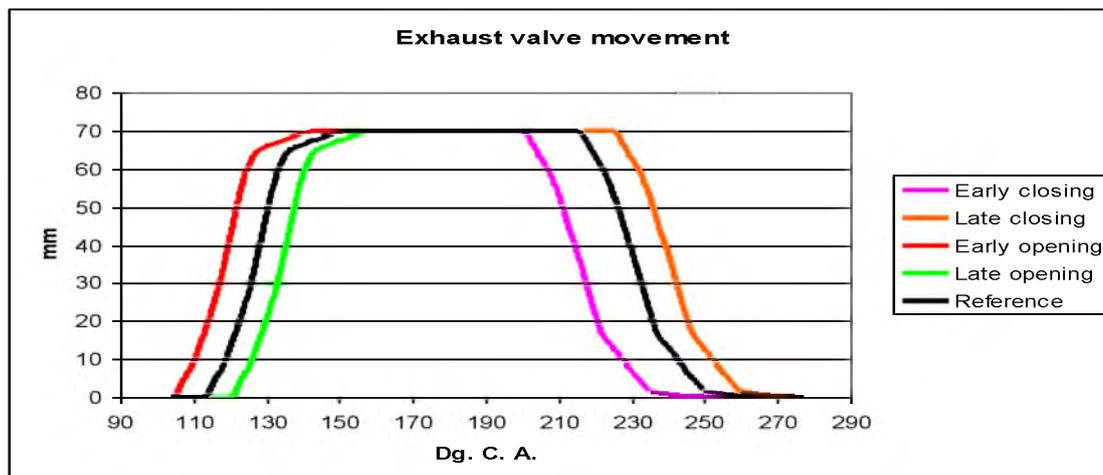


Рисунок 6 – Фазы перемещения выпускного клапана МОД серии ME фирмы MAN B&W:

1 – закрывается рано, 2 – закрывается поздно, 3 – рано открывается, 4 – поздно открывается, 5 – норма, 6 – градусы

Во-первых, необходимо учитывать технологический фактор, зависящий от дизеле-строителя (качество материалов и технологий), особенно лицензиаторов. Основные из них: Япония, Южная Корея, Бразилия, Китай, Тайвань. Поэтому, если часть деталей и узлов поставляет фирма MAN B&W, то большая часть производится заводами других стран (от чего зависит качество продукции в целом). Это наблюдается и части электронных систем и их элементов, которые изготавливаются и настраиваются на номинальные параметры МОД с ЭУ.

Во-вторых, учёт физического износа рабочих поверхностей деталей двигателей весьма затруднителен по указанным причинам, хотя и

неизбежен даже с использованием новых материалов и технологий. Например, высокоуглеродистых легированных сталей (типа C85W6Mo в гидравлических приводах МОД фирмы MAN B&W). Сплавы цветных металлов: на основе никеля (Ni) инконели (Inconel 718) и нимоники (Nimonic 80A); на основе кобальта (Co) стеллиты. Все они обладают жаростойкостью и высокой коррозионной стойкостью, наносятся на рабочие поверхности плазменным напылением или газопламенным способом, широко применяются для выпускных клапанов для посадочных поверхностей и штоков. Это даёт увеличение ресурсов, но не спасает от фрикционного износа пары трения типа золотников [8, 9].

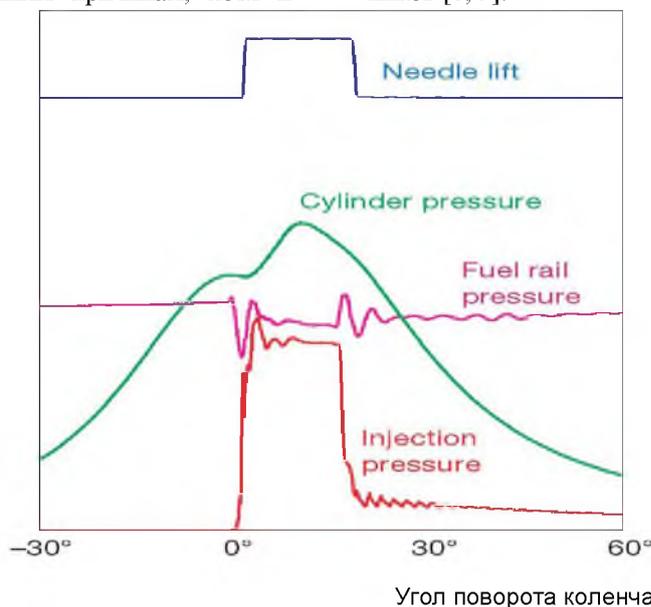


Рисунок 7 – Типичная схема впрыска топлива для двигателей RT-flex фирмы Sulzer со всеми (3) форсунками, работающими синхронно: 1 – теоретический подъем иглы, 2 – давление в топливной трубе (Common Rail), 3 – импульс давления впрыска, 4 – давление в цилиндре, когда все форсунки работают одновременно

Таким образом, появление проблем, связанных с изменением фаз газораспределения в МОД с ЭУ при появлении износов в парах трения СГС, следует отнести к постепенным отказам и предусматривать периодический контроль их величин в процессе эксплуатации судна. При этом нет необходимости вводить дополнительные каналы в диагностическую систему CoCos, а использовать её по изменению рабочих параметров каждого цилиндра, которые будут свидетельствовать о развитии повреждений во всех элементах блоков управления (HCU). При этом целесообразно разработать рекомендации по результатам наблюдений и расчётов значений допускаемых изменений рабочих параметров цилиндров МОД, учитывая случайный характер процессов износов

пар трения (для механических систем принимается нормальный закон распределения) и соизмеримость математического ожидания наработки на отказ с ресурсным временем (32 тыс. часов) [6].

Поддержание технического состояния всех элементов СГС в условия эксплуатации судов за счёт технического обслуживания возможно только при наличии достаточного запаса СЗЧ и ремонтпригодности объектов восстановления типа блока гидравлики цилиндров (HCU), или клапанов подачи топлива (FIVA) [5].

В заключении следует подтвердить возможность предотвращения повреждений МОД с ЭУ в результате износов пар трения в СГС за счёт ТО при наличии достаточного запаса быстро изнашиваемых деталей (понятие введено проф. Балякиным О.К.), ресурс которых не превышает

10-12 тыс. часов. Поставку гидравлических блоков на цилиндры и отдельных деталей к ним целесообразно включать в гарантийные обязательства фирм судостроителей (дизелестроителей), несмотря на то, что повреждения и отказы в СГС наступают через 8-10 тыс. часов (2-3 года), что значительно больше гарантийного периода (1 год).

#### Литература.

1. RT-flex. Training RT-flex, X82, X92. Service Aspects: Chapter 80. Wartsila Land & Sea Academy, 2017. – 127 p.
2. Power Supply, HPS. MAN Diesel & Turbo, 2012. – 59 p.
3. The Sulzer RT-flex Common-Rail System Described: Wartsila Corporation, August 2004. – 15 p.
4. David Brown. Helping shipowners cut fuel bills with Wärtsilä low-speed engines: Wärtsilä Corporation. Feb. 2009. – 5 p.
5. Худяков С.А. Современные судовые малооборотные дизельные двигатели: состояние, перспективы и проблемы / С.А. Худяков, А.В. Игнатенко // Эксплуатация морского транспорта. – 2020. – № 1. – С.143-154.
6. Худяков С.А. Показатели надежности судового малооборотного дизеля с электронным управлением / С.А. Худяков, А.В. Игнатенко // Эксплуатация морского транспорта. – 2020. – № 1. – С.
7. Худяков С.А. Усталостная прочность деталей судовых технических средств: монография / С.А. Худяков, Н.А. Тарануха, М.М. Фролов. – Новороссийск: РИО ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 2019. – 196 с. ISBN 978-5-89426-160-7.
8. Худяков С.А. Анализ причин повреждений и отказов судовых технических средств: учеб. пособие / С.А. Худяков, А.В. Струтынский // – Новороссийск: ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 2020. – 173 с.
9. Худяков С.А. Технологические методы восстановления и повышения износостойкости деталей машин: учеб. пособие / С.А. Худяков, Л.Б. Леонтьев. – Новороссийск: ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 2018. – 176 с.

#### REFERENCES

1. RT-flex. Training RT-flex, X82, X92. Service Aspects: Chapter 80. Wartsila Land & Sea Academy, 2017. – 127 p.
2. Power Supply, HPS. MAN Diesel & Turbo, 2012. – 59 p.
3. The Sulzer RT-flex Common-Rail System Described: Wartsila Corporation, August 2004. – 15 r.
4. David Brown. Helping shipowners cut fuel bills with Wärtsilä low-speed engines: Wärtsilä Corporation. Feb. 2009. – 5 r.
5. Hudyakov S.A. Sovremennyye sudovyye malooborotnyye dizel'nyye dvigateli: sostoyaniye, perspektivy i problemy / S.A. Hudyakov, A.V. Ignatenko // Ekspluatatsiya morskogo transporta, № 1 , 2020. – Novorossiysk, GMU im. adm. F.F. Ushakova. – S.
6. Hudyakov S.A. Pokazateli nadezhnosti sudovogo malooborotnogo dizelya s elektronnyim upravleniem / S.A. Hudyakov, A.V. Ignatenko // Ekspluatatsiya morskogo transporta, № 1 , 2020. – Novorossiysk, GMU im. adm. F.F. Ushakova. – S.
7. Hudyakov S.A. Ustalostnaya prochnost' detalej sudovykh tekhnicheskikh sredstv: monografiya / S.A. Hudyakov, N.A. Taranuha, M.M. Frolov // – Novorossiysk: RIO GMU im. adm. F.F. Ushakova, 2019. – 196 s. ISBN 978-5-89426-160-7.
8. Hudyakov S.A. Analiz prichin povrezhdenij i otkazov sudovykh tekhnicheskikh sredstv: ucheb. posobie / S.A. Hudyakov, A.V. Strutyanskiy // – Novorossiysk: Izd-vo GMU im. adm. F.F. Ushakova, 2020. –173 s.
9. Hudyakov S.A. Tekhnologicheskie metody vostanovleniya i povysheniya iznosostojkosti detalej mashin: ucheb. posobie / S.A. Hudyakov, L.B. Leont'ev // – Novorossiysk: Izd-vo GMU im. adm. F.F. Ushakova, 2018. – 176 s.

УДК 621.1

DOI: 10.34046/aumsuomt95/15

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТОДОВ СОКРАЩЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА ВЫБРОСОВ ОКСИДОВ СЕРЫ ОТ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

*М.А. Модина, кандидат технических наук, доцент*

*В.В. Шкода, кандидат педагогических наук, доцент*

*Р.Р. Туктаров, кандидат технических наук, доцент*

Морской транспорт – один из важнейших компонентов общественного и экономического развития, поглощающий значительное количество ресурсов и оказывающий серьезное влияние на природную среду. Важность решения задач защиты атмосферы от вредных выбросов морских судов определяется тем, что загрязнения от судовых дизелей и котлов составляют наиболее существенную долю от всех видов транспорта. В статье рассматривается проблема снижения и эффективность методов очистки продуктов сгорания от оксидов серы.

**Ключевые слова:** морские суда, выбросы, оксид серы, способы очистки.