

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ОТКАЗОВ ЦИЛИНДРОПОРШНЕВОЙ ГРУППЫ СРЕДНЕОБОРОТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

И. Н. Рубан, В. П. Булгаков

*Астраханский государственный технический университет,
Астрахань, Российская Федерация*

Главными причинами отказов деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ) являются недостаточная прочность, износостойкость и вибростойкость структуры металла. Рассматриваются периоды работы двигателя: период приработки, период нормальной эксплуатации и период интенсивного износа. В периоде приработки основной причиной отказов ЦПГ признан задиры, при котором наблюдаются поломки пальцев, сколы металла кольцевых канавок. Период нормальной эксплуатации зачастую характеризуется внезапными отказами в связи с износом втулок до предельных размеров. Основной причиной отказов металла в третьем периоде интенсивного износа является предельный износ по кавитационной эрозии, а также поломка опорных буртов втулки. Приведена структурная схема системы ЦПГ с последовательным соединением элементов. Проиллюстрирована интенсивность отказов ЦПГ в зависимости от времени эксплуатации. Отмечено, что интенсивность отказов в период приработки по причинам задиров снижена за счет стабилизации структуры, размеров и механических свойств поршня при рабочих температурах (300–350 °С). Интенсивность отказов нормального периода эксплуатации зависит от увеличения абразивной износостойкости металла втулок, повышенной твердости, обусловлена заменой серого чугуна с пластинчатой формой графита на серый чугун с вермикулярной формой графита или на высокопрочный чугун со сферической формой графитных включений. Перечислены положительные и отрицательные качества алюминиевых сплавов по сравнению с чугуном. Подробно рассматриваются варианты повреждений цилиндрических втулок. Наиболее опасным дефектом втулки названо образование трещин в районе верхнего посадочного бурта, вследствие чего до 40 % цилиндрических втулок подлежит замене. Приведены формулы расчетов фактической скорости изнашивания деталей ЦПГ при первых (окончание гарантийных сроков), средних и капитальных ремонтах. Интенсивность отказов последнего периода эксплуатации (интенсивный износ) снижена за счет уменьшения вибрации в системе ЦПГ, снижения амплитуды вынужденных колебаний и сокращения величины теплового зазора между втулкой и поршнем, увеличения жесткости втулки. Определена скорость кавитационного изнашивания модернизированных и обычных втулок, рассматривается влияние жесткости втулки на трещины под буртом и на кавитационное изнашивание до предельно допустимой толщины.

Ключевые слова: цилиндропоршневая группа, отказ, дефекты, прочность, износ, задиры, вибрация, кавитационная эрозия, жесткость втулки.

Для цитирования: Рубан И. Н., Булгаков В. П. Исследование причин отказов цилиндропоршневой группы среднеоборотных двигателей // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2020. № 3. С. 64–70. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-3-64-70.

Введение

Цилиндропоршневая группа (ЦПГ) двигателя внутреннего сгорания осуществляет термодинамический круговой процесс преобразования теплоты в механическую работу. Причины отказов двигателей обуславливаются наличием одновременно нескольких различных исходных дефектов: конструкционных, производственных или эксплуатационных. Около 30 % отказов возникают вследствие эксплуатационных причин, 70 % приходится на конструкционные и производственные дефекты. Из всех вышеприведенных 50 % составляют отказы ЦПГ [1].

Вероятность безотказной работы модели цилиндропоршневой группы

Представим ЦПГ как систему совместно действующих элементов (состоящую из поршня, компрессионных, маслоъемных колец и цилиндрической втулки) для самостоятельного выполне-

ния заданных функций. Надежность ЦПГ оценим по вероятности безотказной работы модели системы из последовательно соединенных элементов (рис. 1), у которой отказ любого из элементов вызывает отказ системы и двигателя. Отказы элементов принимаются независимо друг от друга.

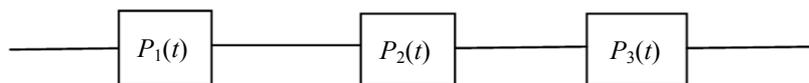


Рис. 1. Структурная схема системы ЦПГ с последовательным соединением элементов

Вероятность совместного проявления безотказной работы элементов ЦПГ как независимых событий равна произведению вероятностей этих событий [2]:

$$P(t) = P_1(t)P_2(t)P_3(t),$$

где $P_1(t)$ – вероятность безотказной работы поршня за время эксплуатации; $P_2(t)$ – вероятность безотказной работы колец за время эксплуатации; $P_3(t)$ – вероятность безотказной работы втулки за время эксплуатации.

Работоспособность ЦПГ оцениваем за три периода работы двигателя. *Период приработки* – отказы при испытании изделия в начале эксплуатации; после ремонта появляется отбраковка по конструкционным дефектам, технологическим и производственным. *Период нормальной эксплуатации* характеризуется внезапными отказами сравнительно постоянной интенсивности. *Период интенсивного износа* – появляются отказы возрастающей интенсивности, вызываемые старением элементов. Все отказы равноценны с позиции того, что они приводят к невозможности выполнения дизелем заданных функций, их влияния на процесс эксплуатации двигателя различны. Отказ дизеля, приводящий к невозможности использования его по назначению на данном судне до устранения его вне судна, – наиболее тяжелый вид отказа. По наработкам до появления полных отказов определяется ресурс дизеля до капитального ремонта. Самыми сложными устраняемыми видами отказов в процессе эксплуатации двигателя являются отказы деталей ЦПГ [3]. На рис. 2 проиллюстрирована кривая интенсивности отказов ЦПГ в зависимости от времени эксплуатации.

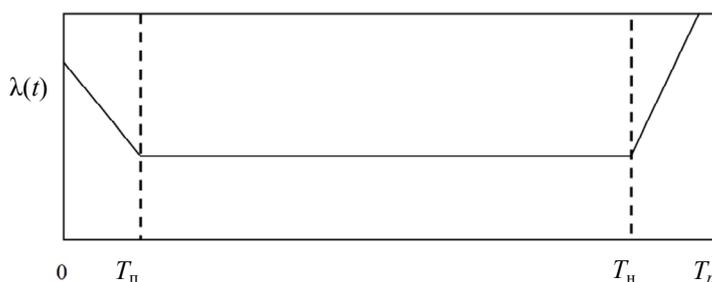


Рис. 2. Интенсивность отказов ЦПГ в зависимости от времени эксплуатации:
 $0-T_n$ – период приработки; T_n-T_n – период нормальной эксплуатации;
 T_n-T_p – период интенсивного износа

Расчетная формула для определения показателей безотказности:

$$P_0(t) = e^{-\lambda t},$$

где $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3$ – суммарная интенсивность отказов на режимах работы; t – расчетное время работы (нормативная наработка).

Среднее время безотказной работы:

$$T_p = \frac{1}{\lambda}.$$

Обработка статистических данных производится по нормальному закону или закону Вейбулла [4]. Любой отказ является следствием дефектов, допущенных при проектировании, изготовлении или эксплуатации отказавшей детали, и приводит к аварии двигателя.

Характерные износы и повреждения деталей поршневой группы

Материалом для изготовления цельных поршней среднеоборотных двигателей служат серые чугуны марки СЧ28, СЧ32, высокопрочные чугуны ВЧ45, ВЧ50 и алюминиевые литейные сплавы АЛ1, АЛ19, АЛ25.

Преимущества алюминиевых сплавов: меньшая плотность $\gamma = 2,7-2,8 \text{ г/см}^3$ позволяет снизить массу поршня и, следовательно, силы инерции; более высокая теплопроводность (в 3–4 раза выше, чем у чугуна) и небольшой коэффициент трения дают возможность применять неохлаждаемые поршни и снизить температуру поршня до 350 °С (против 450 °С для чугуна), температуру под канавкой верхнего поршневого кольца снизить до 180 °С (против 230 °С для чугунного). Поршни из алюминиевого сплава более технологичны при изготовлении.

Недостатки алюминиевых сплавов: более низкие механические свойства, чем у чугуна, ухудшающиеся при нагреве, высокая стоимость, меньшее сопротивление износу. Высокий коэффициент линейного расширения требует увеличение теплового зазора между поршнем и втулкой. Большой тепловой зазор при пуске холодного двигателя служит причиной снижения герметичности цилиндрического пространства и вызывает появление ударов поршня по втулке при переходе поршня через мертвые точки. Из-за большого коэффициента линейного расширения (в 2–3 раза выше, чем у чугуна) необходимо увеличить радиальный зазор между тронком поршня и цилиндра почти в 2 раза по сравнению с чугунными поршнями, что затрудняет пуск двигателя, вызывает стуки при работе на малых нагрузках и увеличивает тепловую нагрузку верхних поршневых колец [5]. Износу подвергается тронк поршня (приобретая эллиптичность), поршневой палец, поршневые кольца. Причины износа – абразивный и коррозионный износ.

Задир и заклинивание поршня – тяжелая авария, в результате которой на поршне и втулке появляются глубокие риски, борозды, образуются трещины, происходит отрыв головки поршня и обрыв шатунного болта. Причины: быстрая нагрузка непрогретого двигателя, неравномерный нагрев деталей. Поршень нагревается быстрее, чем втулка, тепловой зазор между ними выбирается полностью, и происходит заклинивание поршня. Перекос движения из-за неправильной центровки – поломка поршневых колец. Трещины в головке поршня возникают из-за дефектов конструкций или нарушений правил обкатки дизеля. К первым относится литейный брак: раковины, усадочные трещины, остаточные напряжения, химическая неоднородность поршня по высоте поршня и в радиальном направлении, что влияет на физические и механические свойства отливки, образует перекося поршня и заклинивание [5].

В период приработки отказы ЦПГ характеризуются дефектами поршня, которые можно классифицировать как производственные и эксплуатационные. Задир – основная причина отказов ЦПГ. Глубокие риски на втулке и поршне, разрушение кольцевых канавок, поломка колец. Изломы носят статический характер. Внезапные перегрузки: тепловые, механические, динамические, – создают напряжение, значительно превышающее запас прочности. Поломка поршневых колец происходит при недостаточном тепловом зазоре или канавке, при чрезмерном износе кольца и втулки, когда кольца упруго деформируются, проходя с частотой вращения коленчатого вала, и разрушаются от усталостных напряжений. Материал для изготовления колец: серый чугун СЧ21, СЧ24 с повышенным содержанием фосфора, присадками никеля, хрома и молибдена. Твердость чугунных колец на 15–20 НВ выше цилиндрической втулки, т. к. удельная работа трения колец значительно больше, чем втулки. Кроме того, кольца работают в более тяжелых условиях. Иногда с целью уменьшения износа более дорогой детали – втулки – твердость колец делают на 15–20 НВ меньше втулки. Залегание колец в канавках вызывает поломку колец и задир.

Повреждение цилиндрических втулок

Втулка испытывает значительные механические и тепловые напряжения. Во время работы двигателя на ее стенки действуют сила давления газов, боковая сила давления поршня и сила трения, возникающая при движении поршня. Втулка нагревается горячими газами. Перепад температур по обе стороны стенки создает температурные напряжения в стенке, при этом более горячие волокна внутренней поверхности испытывают напряжения сжатия, холодные волокна со стороны охлаждения – напряжения растяжения. К материалу втулок предъявляются требования: высокая прочность, износостойкость, непроницаемость для газов и воды, устойчивость против коррозии, кавитации, хорошая обрабатываемость. Для изготовления втулок применяют легированные чугуны с пределом прочности до 450–520 МПа. Для уменьшения износа чугунные втулки иногда покрывают слоем пористого хрома толщиной 0,4 мм [6].

Причинами образования трещин в верхней части втулок могут быть большие температурные напряжения при резком охлаждении перегретого двигателя, местный перегрев втулки вследствие большого отложения накипи в зарубашечном пространстве, коррозионные разрушения в виде глубоких свищей со стороны полости охлаждения, задир при заклинивании поршня. Обрыв опорного пояса втулки чаще всего происходит при чрезмерной или неравномерной затяжке шпилек крепления крышки, а также при неудачной конструкции бурта. Износ втулок происходит неравномерно: наибольший износ – в верхней части, поэтому втулка приобретает конусность. В тронковых двигателях боковая сила давления поршня вызывает эллиптичность. Повышенный износ верхней части втулки объясняется высоким давлением верхнего поршневого кольца и неблагоприятными условиями смазки, а также интенсивными температурными процессами при сгорании топлива.

Коррозия происходит как результат окисления металла под действием хлоридов растворенного в воде кислорода, так и вследствие электрохимических процессов, вызываемых химической неоднородностью металла втулки.

Наиболее опасный дефект втулки – образование трещин в районе верхнего посадочного бурта. Из-за этого дефекта заменяют до 40 % цилиндрических втулок [7].

Замеры износов деталей ЦПГ производятся при первых переборках (окончание гарантийных сроков), средних и капитальных ремонтах. На основании данных, полученных при замерах, рассчитывается фактическая скорость изнашивания:

$$v_{\phi,н} = \omega t,$$

где ω – фактический износ, мкм; t – отработанное время, тыс. ч.

Остаточный ресурс рассчитывается по формулам

$$t_1 = (\omega_p - \omega) / v_{cp} \quad \text{при } v_{\phi} > v_2;$$

$$t_2 = (s_p - s) / v_{\phi} \quad \text{при } v_{\phi} > v_2,$$

где ω_p – предельный износ, мкм; s_p – предельный зазор; v_{ϕ} – фактическая скорость, мкм/тыс. ч.; v_2 – нормативная скорость изнашивания, мкм/тыс. ч.

Скорость образования зазора: $v_3 = (s - s_m) / t$, где s и s_m – замеренный и монтажный зазоры, мкм.

Кавитационный износ и трещины под буртом

Кавитационно-эрозионные разрушения наблюдаются на участках наружной поверхности, где проявляется вибрационное воздействие от ударов поршня при перекладке. Причинами разрушения стенок втулки являются процессы, возникающие в системе охлаждения и внутри металла под воздействием высокочастотной вибрации. Процессы изнашивания втулок с чугунными поршнями происходят менее интенсивно, чем у втулок с алюминиевыми поршнями. Скорость кавитационного изнашивания может быть уменьшена повышением жесткости втулки. Увеличенный зазор в нижнем посадочном поясе и недостаточная жесткость втулки приводят к росту амплитуды колебаний и способствуют возникновению трещин под верхним опорным буртом [8]. Повышение жесткости втулок вследствие увеличения толщины стенок благоприятно сказывается на исключении трещин под буртами и способствует снижению коррозионного износа. Определена скорость кавитационного изнашивания модернизированных и обычных втулок, по которой определен ресурс (тыс. ч) до предельной глубины кавитационных раковин (табл.) [9]:

$$T_{30} = \frac{s_1 - s_2}{V_{\max}} = \frac{30 - (10-8)}{0,429} = 46 \div 51 \text{ тыс. ч.};$$

$$T_{18} = \frac{s_1 - s_2}{V_{\max}} = \frac{18 - (10-8)}{0,65} = 12 \div 14 \text{ тыс. ч.},$$

где s_1 – первоначальная толщина стенок, мм; s_2 – предельно допускаемая в эксплуатации остаточная толщина стенок втулки: $s_2 = 8 \div 10$ мм; V_{\max} для втулки толщиной 30 мм составляет 0,429 мкм/тыс. ч; V_{\max} для втулки толщиной 18 мм составляет 695 мкм/тыс. ч.

Влияние жесткости втулки на трещины под буртом и на кавитационное изнашивание до предельно допускаемой толщины

Толщина втулки, мм	Скорость кавитационного изнашивания, мкм/тыс. ч		Ресурс, тыс. ч	Кавитационная эрозия	Трещины под буртом
	min	max			
30	343	429	45÷51	Не наблюдается	Не наблюдаются
18	534	695	12÷14	Наблюдается в зоне верхнего кольца	Наблюдаются

Интенсивность кавитационного изнашивания уменьшается с увеличением отношения толщины стенки к диаметру цилиндра. Жесткость втулки считаем критерием интенсивности кавитационного изнашивания втулки:

$$K_u = \frac{d}{D},$$

где d – толщина стенки втулки, мм; D – диаметр втулки, мм.

При $K < 9$ наблюдаются кавитация и трещины под буртом. При $K > 9$ кавитация и трещины под буртом не наблюдаются [10].

В результате исследования кавитационного износа и дефектов буртов верхней части втулки установили механизм разрушения и подтвердили влияние вибрации на долговечность втулки. Установлено, что амплитуда собственных колебаний втулки в резонансе с вынужденными приводит к ускоренному износу втулки, увеличивает тепловой зазор между поршнем и втулкой. Увеличение зазоров способствует повышению вибрации, вызывает усталостные разрушения посадочного бурта. Вместе с этим активно развивается кавитационная эрозия в местах вибрационных максимумов, утончение стенок втулки, разрушение графитных включений в чугунах создает проницаемость втулки как для газов, так и для охлаждающей воды [11].

Кавитационно-эрозионная стойкость характеризуется твердостью, пределом прочности и пределом текучести, а также определяется комплексом свойств отдельных структурных составляющих и зависит от размеров зерна и его границ. Кавитационно-эрозионная стойкость чугуна определяется формой графита (наилучшая форма – шаровидная). Термическая обработка повышает стойкость серого чугуна, если полученная металлическая основа содержит тонкопластинчатый перлит и сорбит отпуска. Введение в чугун никеля повышает коррозионную стойкость, т. к. никель не изменяет общие условия графитообразования, а увеличивает степень дисперсности перлита в карбидной смеси и способствует образованию мелкодисперсного перлита. Легирование никелем чугуна с пластинчатым графитом не дает положительных результатов, а легирование чугуна с шаровидным графитом (Ni – 1 %; Mo – 0,3 %) приводит к резкому повышению кавитационно-эрозионной стойкости [12].

Заключение

В периоде приработки основной причиной отказов ЦПГ является задир; при этом наблюдаются поломки пальцев, сколы металла кольцевых канавок. Изломы разрушенного металла носят статический характер. Интенсивность отказов в период приработки по причинам задира снижена за счет стабилизации структуры, размеров и механических свойств поршня при рабочих температурах (300–350 °С).

В периоде нормальной эксплуатации наблюдаются внезапные отказы в связи с износом втулок до предельных размеров. Интенсивность отказов нормального периода эксплуатации понижена за счет увеличения абразивной износостойкости металла втулок, повышения твердости, замены серого чугуна с пластинчатой формой графита на серый чугун с вермикулярной формой графита или на высокопрочный чугун со сферической формой графитных включений.

В третьем периоде интенсивного износа основными причинами отказов металла являются предельный износ по кавитационной эрозии и поломка опорных буртов втулки. Интенсивность отказов третьего периода эксплуатации снижена за счет уменьшения вибрации в системе ЦПГ, увеличения жесткости втулки, снижения амплитуды вынужденных колебаний и сокращения величины теплового зазора между втулкой и поршнем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Возницкий И. В., Михеев Е. Г. Судовые дизели и их эксплуатация. М.: Транспорт, 1990. 360 с.
2. Половко А. М., Гуров С. В. Основы теории надежности. СПб.: Петербург, 2006. 704 с.

3. Астахов С. В., Ватинко Б. А., Халавко Л. П. Оценка надежности судовых механизмов при проектировании и эксплуатации. Л.: Судостроение, 1979. 200 с.
4. Решетов Д. Н., Иванов А. С., Фадеев В. З. Надежность машин. М.: Высш. шк., 1988. 240 с.
5. Булгаков В. П., Чеботарев Ю. В., Рубан И. Н. Влияние химической неоднородности отливки поршня из сплава АК12М2МгН (АЛ25) на задирообразование в цилиндропоршневой группе // Вестн. Гос. ун-та мор. и реч. флота им. адм. С. О. Макарова. 2016. Вып. 5 (39). С. 151–157.
6. Возницкий И. В., Чернявская Н. Г. Судовые двигатели внутреннего сгорания. Устройство и эксплуатация. М.: Транспорт, 1974. 424 с.
7. Карпов Л. М. Надежность и качество судовых дизелей. Л.: Судостроение, 1975. 232 с.
8. Пимашенко А. П., Валишин А. Г. Комплексные методы повышения надежности цилиндровых втулок судовых дизелей. М.: Колос, 2007. 168 с.
9. Булгаков В. П., Рубан И. Н. Влияние вибрации на кавитационный износ цилиндрической втулки среднеоборотных двигателей // Мор. интеллектуал. технологии. 2018. № 1 (39). Т. 1. С. 135–139.
10. Иванченко Н. Н., Скуридин А. А., Никитин М. Д. Кавитационные разрушения в дизелях. М.: Машиностроение, 1970. 152 с.
11. Кондратьев Н. Н. Отказы и дефекты судовых дизелей. М.: Транспорт, 1985. 152 с.
12. Елизаветин М. А. Повышение надежности машин. М.: Машиностроение, 1973. 431 с.

Статья поступила в редакцию 15.07.2020

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Рубан Ирина Николаевна – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; аспирант кафедры судостроения и энергетических комплексов морской техники; irinaguban1979@mail.ru.

Булгаков Владимир Павлович – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; д-р техн. наук, профессор; профессор кафедры судостроения и энергетических комплексов морской техники; mbulgak@mail.ru.



STUDY OF FAILURES OF RECIPROCATING MEDIUM-SPEED DIESEL ENGINES

I. N. Ruban, V. P. Bulgakov

*Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russian Federation*

Abstract. The article is focused upon the problems of reciprocating diesel engines. The main reason for the failure of cylinder-piston group (CPG) parts is insufficient strength, wear resistance, and resistance of the metal structure to vibration. There are studied the following periods of engine operation: running-in period; period of normal operation; period of intensive wear. In the burn-in period, the main cause of CPG failures is scuffing, when finger breaking or ring groove chipping take place. Sudden failures during normal operation occur due to the wear of the bushings to the limit size. In the third period of intensive wear the main cause of metal failures is the ultimate wear by cavitation erosion and breakage of the bushing collar. The block diagram of the CPG system with serial connection of elements is given. The rate of CPG failures is illustrated depending on the time of operation. It has been found that the failure rate during the running-in period due to scuffing is reduced because of stabilization of the structure, dimensions and mechanical properties of the piston at operating temperatures (300–350°C). The failure rate of the normal period of operation depends on the increase in the abrasive wear resistance of the metal of bushings, increased hardness, due to the replacement of gray cast iron with lamellar graphite by gray cast iron with vermicular graphite or by high-strength cast iron with spherical graphite inclusions. There are listed the positive and negative qualities of aluminum alloys in comparison with cast iron. Variants of damage to cylinder liners are considered in detail. The most dangerous defect in the bushing is the cracks in the upper liner collar, as a result of which about 40% of the cylinder bushings must be replaced. The formulas for calculating the actual wear rate of the CPG parts during the first (end of warranty periods), medium and major overhauls are given. The failure rate of the last period

of operation (intensive wear) is reduced by reducing vibration in the CPG system, reducing the amplitude of forced vibrations and reducing the size of the thermal gap between the sleeve and the piston, increasing the rigidity of the sleeve. The rate of cavitation wear of modernized and conventional bushings is determined, the influence of the bushing stiffness on cracks under the shoulder and on cavitation wear up to the maximum permissible thickness is considered.

Key words: cylinder-piston group, failure, defects, strength, wear, scuffing, vibration, cavitation erosion, sleeve stiffness.

For citation: Ruban I. N., Bulgakov V. P. Study of failures of reciprocating medium-speed diesel engines. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2020;3:64-70. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-1574-2020-3-64-70.

REFERENCES

1. Voznitskii I. V., Mikheev E. G. *Sudovye dizeli i ikh ekspluatatsiia* [Marine diesel engines and their operation]. Moscow, Transport Publ., 1990. 360 p.
2. Polovko A. M., Gurov S. V. *Osnovy teorii nadezhnosti* [Principles of theory of reliability]. Saint-Petersburg, Peterburg Publ., 2006. 704 p.
3. Astakhov S. V., Vatipko B. A., Khalavko L. P. *Otsenka nadezhnosti sudovykh mekhanizmov pri proektirovanii i ekspluatatsii* [Assessment of reliability of ship mechanisms in design and operation]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1979. 200 p.
4. Reshetov D. N., Ivanov A. S., Fadeev V. Z. *Nadezhnost' mashin* [Machine reliability]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988. 240 p.
5. Bulgakov V. P., Chebotarev Iu. V., Ruban I. N. Vliianie khimicheskoi neodnorodnosti otlivki porshnia iz splava AK12M2MgN (AL25) na zadiroobrazovanie v tsilindroporshnevoi gruppe [Influence of chemical heterogeneity of piston casting from AK12M2MgN (AL25) alloy on scuffing in cylinder-piston group]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2016, iss. 5 (39), pp. 151-157.
6. Voznitskii I. V., Cherniavskaia N. G. *Sudovye dvigateli vnutrennego sgoraniia. Ustroistvo i ekspluatatsiia* [Internal combustion engines. Design and operation]. Moscow, Transport Publ., 1974. 424 p.
7. Karpov L. M. *Nadezhnost' i kachestvo sudovykh dizelei* [Reliability and quality of marine diesel engines]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1975. 232 p.
8. Pimashenko A. P., Valishin A. G. *Kompleksnye metody povysheniia nadezhnosti tsilindrovyykh vtulok sudovykh dizelei* [Complex methods of increasing reliability of cylinder liners of marine diesel engines]. Moscow, Kolos Publ., 2007. 168 p.
9. Bulgakov V. P., Ruban I. N. Vliianie vibratsii na kavitatsionnyi iznos tsilindrovoi vtulki sredneobrotnykh dvigatelei [Influence of vibration on cavitation wear of cylinder liner of medium-speed engines]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, 2018, no. 1 (39), vol. 1, pp. 135-139.
10. Ivanchenko N. N., Skuridin A. A., Nikitin M. D. *Kavitatsionnye razrusheniia v dizeliakh* [Cavitation damage in diesel engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970. 152 p.
11. Kondrat'ev N. N. *Otkazy i defekty sudovykh dizelei* [Failures and defects of marine diesel engines]. Moscow, Transport Publ., 1985. 152 p.
12. Elizavetin M. A. *Povyshenie nadezhnosti mashin* [Improving machine reliability]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973. 431 p.

The article submitted to the editors 15.07.2020

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ruban Irina Nikolaevna – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Postgraduate Student of the Department of Shipbuilding and Power Complexes of Marine Engineering; irinaruban1979@mail.ru.

Bulgakov Vladimir Pavlovich – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Shipbuilding and Power Complexes of Marine Engineering; mbulgak@mail.ru.

