

## РАБОЧИЕ РЕЖИМЫ И РЕСУРСНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДИЗЕЛЕЙ 9L28/32A-F ФИРМЫ MAN-B&W В ПРОЦЕССЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

*В. Н. Кучеров*

*Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского,  
Владивосток, Российская Федерация*

Дизели L23/30, L28/32 фирмы MAN-B&W получили широкое применение в мировом флоте в силу их высоких эксплуатационных качеств при сравнительно простом конструкционном исполнении их ответственных деталей и элементов. Дизели имеют достаточно высокую форсировку рабочего процесса, сохраняя при этом высокую для среднеоборотного двигателя экономичность и ресурсные показатели большинства базовых деталей и двигателя в целом. Рассматриваются положительные и некоторые отрицательные качества указанных дизелей, которые также важны, как показатели технического уровня, в сравнении с проектируемыми образцами при выборе базового двигателя. Представлен анализ работоспособности, характерные отказы деталей цилиндропоршневой группы и других ответственных элементов среднеоборотных дизелей 9L28/32 фирмы MAN-B&W за длительный период работы при различных режимах нагружения и эксплуатации. Проиллюстрировано состояние поршневой группы при первом с постройки техническом обслуживании с ревизией цилиндров на двух дизелях после наработки 22 424 и 22 672 моточасов при рекомендованном периоде 12 000 ч для тяжелого топлива. Выявлена возможность дальнейшего повышения периода между техническим обслуживанием с разборкой цилиндров. На основании данных проводимого контроля и мониторинга состояния цилиндровых втулок и поршневых колец каждого цилиндра ревизии цилиндропоршневой группы выполнялись далее исключительно «по состоянию». Получена максимальная наработка дизеля (40 086 ч) без ревизии цилиндров при экономических режимах нагружения до 75 % от номинальной мощности. На рассматриваемом двигателе танкера «Георгий Фройер» за 12 лет эксплуатации при наработке 64 500 моточасов была выполнена ревизия только 15 поршней вместо 48 плановых с заменой 39 поршневых колец вместо 194, рекомендованных заданным сроком службы колец. В дальнейшем двигатели отработали до 100 тыс. ч без капитального ремонта при высоких ресурсных показателях основных элементов на двух двигателях в судовой компании. Выявлены и рассмотрены проблемы и сложности в эксплуатации данных двигателей с изобарной системой наддува на судах с винтом фиксированного шага.

**Ключевые слова:** судовой дизель, цилиндрическая втулка, поршень, поршневые кольца, изнашивание, ресурсные показатели, воздухообеспечение, режимы работы дизеля, температура газов.

**Для цитирования:** Кучеров В. Н. Рабочие режимы и ресурсные показатели дизелей 9L28/32A-F фирмы MAN-B&W в процессе длительной эксплуатации // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2020. № 1. С. 94–105. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-1-94-105.

### Введение

В условиях жесткой конкуренции обеспечение рентабельности работы судов в разных регионах страны приобретает особую важность и актуальность. В значительной степени эффективность работы судов зависит от совершенства технической эксплуатации энергетической установки. На ее долю приходится до 90 % повреждений от общего количества по судну, а затраты на техническую эксплуатацию достигают 60–70 % от общих затрат по судну [1]. Главные двигатели являются основными агрегатами судовой энергетической установки. От их работоспособности во многом зависят технико-эксплуатационные качества судна, безопасность мореплавания, а также надежность работы энергетической установки в целом.

Проблема обеспечения надежности является одной из центральных на всех стадиях жизненного цикла двигателя: проектирование, производство, эксплуатация. Совершенствование технической эксплуатации судовых дизелей неразрывно связано с проблемой повышения эффективности их технического обслуживания при минимальных затратах. Одним из путей решения данного вопроса является широкое внедрение в практику эксплуатации морских судов системы технического обслуживания по фактическому состоянию.

Увеличение ресурсных показателей главного двигателя возможно посредством грамотного анализа результатов эксплуатации дизеля, периодической оценки состояния цилиндропоршневой группы (ЦПГ) с использованием диагностических приборов в процессе эксплуатации, профилактических осмотров и планового технического обслуживания. На основании анализа результатов эксплуатации могут быть сделаны выводы о качестве подготовки и использования рекомендованных сортов тяжелого топлива, оптимальных и допустимых нагрузках главного двигателя в различных условиях эксплуатации судна.

### **Материалы исследования**

На современных судах широко используются среднеоборотные дизели. К их числу относится четырехтактный двигатель фирмы MAN-B&W 9L28/32A-F. Данные дизели различной размерности и числа цилиндров входят в лицензионную программу для строительства на заводе ОАО «Румо» в России [2, 3], и поэтому опыт их эксплуатации представляет особый интерес.

В Дальневосточном бассейне эксплуатировалось шесть дизелей 9L28/32 A-F, которые построены на фирме HYUNDAI Республики Корея в 1994–1996 гг. и установлены на танкерах DW 4 990 т. Три танкера типа «Анива» приобрело ОАО «Приморское морское пароходство», танкер «Океан» – ОАО «Камчатрыбфлот», и два танкера («Василий Клименко» и «Георгий Фройер») – ОАО «Владивостокская база тралового и рефрижераторного флота» (последние далее перешли в судоходную компанию ЗАО «Дельта»). Параметры дизеля: диаметр цилиндра  $D = 280$  мм, ход поршня  $S = 320$  мм, частота вращения  $n = 775$  мин<sup>-1</sup>, среднее эффективное давление  $p_{me} = 19,3$  бар, эффективная мощность  $P_e = 2\,206$  кВт, удельный расход топлива – 199,5 г/(кВт·ч). Дизель номинирован для работы на мазутах с вязкостью до 380 мм<sup>2</sup>/с при 50 °С. Однако при вязкости более 180 мм<sup>2</sup>/с требуется согласование с фирмой-изготовителем.

Дизель простой конструкции с подвесным коленчатым валом. Цилиндровая втулка обычной формы без внутриканального охлаждения с теплозащитной вставкой в верхнем поясе, обладающей противоположенным эффектом. Поршень изготовлен из высокопрочного чугуна, поверхность тронка имеет графитосодержащее покрытие для повышения трибологических качеств пары трения. На поршне с масляным охлаждением имеется три компрессионных поршневых кольца. Два верхних кольца простой формы с прямоугольным сечением, третье – с комбинированными функциями, прямоугольное, с внутренним уступом скребкового типа – маслосъемное кольцо обычной конструкции с экспандером. Все кольца хромированы. Крышка цилиндра из высокопрочного чугуна имеет внутриканальное охлаждение, выхлопные клапаны с газовым импеллером, всасывающие – с устройством проворачивания типа «Ротокап» [4]. При использовании тяжелого топлива назначенный ресурс для основных сменных деталей приведен в табл. 1 [5].

*Таблица 1*

**Ресурсные показатели деталей дизеля 9L28/32A-F, назначенные заводом-производителем, при работе на тяжелом топливе**

<b>Наименование детали</b>	<b>Ресурс, тыс. ч</b>	<b>Техническое обслуживание, тыс. ч</b>
Поршень	60	–
Поршневые канавки	–	30–40
Компрессионные и маслосъемные кольца	12–18	12–18
Втулка цилиндров	50	12–18
Выхлопные клапаны (2 шлифовки)	24–36	12–18
Впускные клапаны (2 шлифовки)	24–36	12–18
Направляющая втулка клапана	24–36	–
Ротокап	18–24	–
Крышка цилиндров	80	–
Рамовые подшипники	30	–
Мотылевые подшипники	24–36	–
Шатун	60	–
Распылители форсунок	4–6	1,5
Элементы топливного насоса высокого давления (ТНВД) (плунжерные пары)	18–24	По состоянию
Сопловой аппарат турбины	20–24	12
Кулачковый вал	50	–
Воздухоохладитель	60	–
Силиконовый демпфер крутильных колебаний	30–40	–
Подшипники турбокомпрессора	20–24	12
Подшипники распредвала	50	–

Два танкера типа «Анива» работали во фрахте в одной из Сингапурских компаний и эксплуатировались в тропических условиях с высокими нагрузками и на предельном по заданным показателям тяжелом топливе. В таких условиях наиболее нагруженными элементами оказываются выхлопные клапаны и топливная аппаратура.

Согласно записям в формуляре технического состояния на танкере «Анива» за 4,5 года с постройки дизель отработал 26 830 ч. За этот период в условиях интенсивной эксплуатации закуплено 43 плунжерные пары для топливных насосов, 72 распылителя форсунок, 58 выхлопных клапанов.

Нормативные ресурсные показатели основных деталей приведены в табл. 1.

На головном судне судоходной компании «Дельта», танкере «Василий Клименко», главный двигатель в первый год эксплуатации работал на котельных мазутах типа М-40 с повышенной вязкостью и нагрузками по мощности до 90 % от номинальной.

После эксплуатации 22 424 ч с постройки без ревизии (моточистки) ЦПГ на двигателе был отмечен постепенно возрастающий расход циркуляционного масла до 150 кг/сут, или 2,7 г/(кВт·ч), в расчете на номинальную мощность с превышением проектных значений в 2–2,5 раза.

Для проверки состояния ЦПГ был вскрыт цилиндр № 9. При осмотре поршня оказалось: первое поршневое кольцо потеряло упругость, в ручье и на тыльной стороне кольца имелся полусухой нагар толщиной до 1 мм. Второе кольцо имело износ 0,41 мм и сохранило упругие свойства и работоспособность. Износ третьего, компрессионно-маслосъемного, кольца не превысил 0,05 мм.

Маслосъемное кольцо потеряло 13,2 % в радиальной толщине (0,79 мм). Ширина маслосъемных кромок возросла в 2,2 раза. Значительного нагарообразования в канавках и на кольцах не обнаружено. Цилиндровая втулка в нижней и средней части имела отдельные следы хонингования. Абсолютный износ с учетом исходного размера не превысил 0,11 мм. Предельный износ, при котором втулка подлежит замене, – 0,6 мм. Тронк поршня чистый, без следов лакообразования и натиров. Канавки поршневых колец имели абсолютный износ 0,1 мм для первого ручья и 0,02 – 0,06 мм для нижележащих. Предельно допустимый износ канавки поршня составляет +0,25 мм от установленного зазора. Показатели работоспособности и скорости изнашивания указанных элементов ЦПГ приведены на гистограмме (рис. 1).

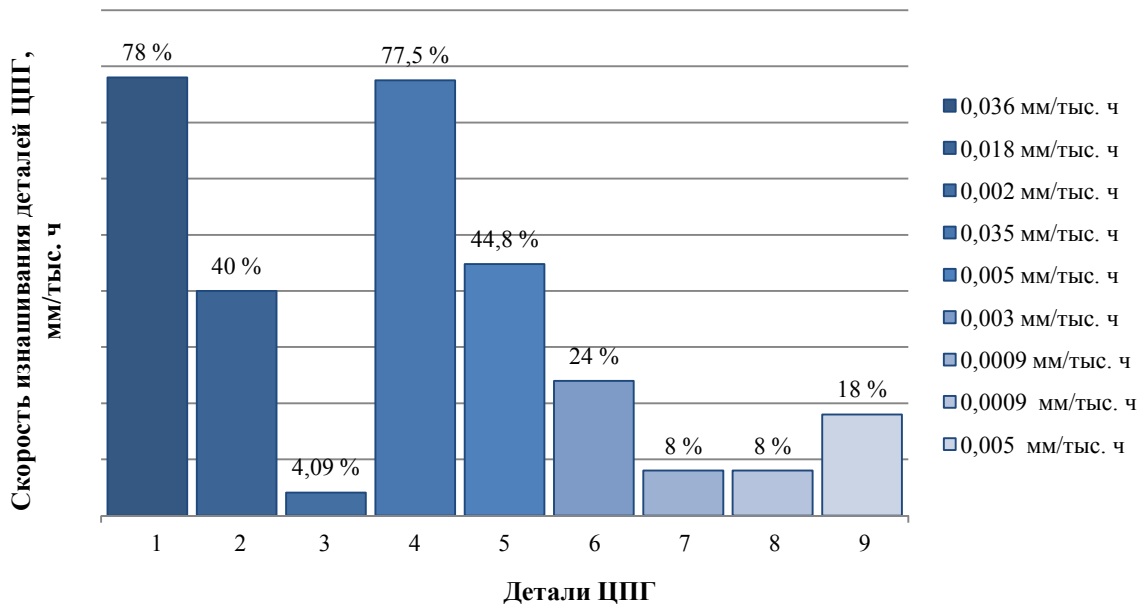


Рис. 1. Процент допустимого износа и скорость изнашивания деталей ЦПГ главного двигателя танкера «Василий Клименко» (первая ревизия, наработка – 22 424 ч): 1 – первое поршневое кольцо; 2 – второе поршневое кольцо; 3 – третье поршневое кольцо; 4 – маслосъемное кольцо; 5 – первая поршневая канавка; 6 – вторая поршневая канавка; 7 – третья поршневая канавка; 8 – канавка маслосъемного кольца; 9 – цилиндрическая втулка

После наработки 23 270 ч было проведено техническое обслуживание (полная моточистка) всех цилиндров. Состояние цилиндров оказалось аналогичным цилиндру № 9. За указанный период дизель преимущественно эксплуатировался на смазочном масле Mobilgard 330, а в дальнейшем переведен на российское масло М-14-Д (цл 30).

Из анализа износных показателей следует, что ресурс маслосъемных и компрессионных колец укладывается в проектные показатели 18 тыс. ч и даже значительно их превышает. Но становится очевидным и естественным, что первое компрессионное и маслосъемное кольца на уровне износов второго и третьего колец являются деталями, которые ограничивают общий ресурс ЦПГ. Также анализ подтвердил, что наиболее слабыми элементами в ЦПГ являются первые поршневые канавки, которые выработали за 23 270 ч почти 50 % своего износного ресурса. Плановый срок службы поршня – 60 тыс. ч, но по канавкам поршня фирма назначает контрольный интервал проверки 30–40 тыс. ч.

Судя по удельному износу в 0,005 мм/тыс. ч, наработка цилиндровой втулки может превзойти плановые 50 тыс. ч.

Были определены мероприятия для увеличения и без того неплохих ресурсных показателей ЦПГ посредством увеличения ресурса первых поршневых колец, первых поршневых канавок и маслосъемных колец данного дизеля за счет:

1. Применения более легких сортов топлива в пределах, рекомендованных фирмой, с вязкостью до 180 мм<sup>2</sup>/с;
2. Снижения эксплуатационных нагрузок на дизель – ближе к экономическим, в нашем случае 70–75 % от номинальной мощности. Это диктуется условиями воздухоснабжения дизеля с изобарной турбиной при работе на винт фиксированного шага. Удовлетворительное воздухоснабжение начинается при нагрузках выше 70 % от номинальной мощности;
3. Более глубокой очистки смазочного масла.

С учетом опыта эксплуатации дизеля головного судна на следующем танкере, «Георгий Фройер», с начала эксплуатации было решено применять более легкие сорта мазутов М40 с вязкостью – не более 180 мм<sup>2</sup>/с, с содержанием серы – до 2 % при умеренной нагрузке на дизель, которая не должна превышать 75–80 % от номинальной мощности.

Кроме того, были предприняты меры по совершенствованию системы смазки данного дизеля. С постройки в системе циркуляционной смазки были установлены автоматический масляный фильтр, частично-поточный объемный фильтр с поляризационным эффектом и полнопоточными фильтрами на бумажной основе на входе в двигатель. Вскоре вышли из строя высоковольтные трансформаторы поляризации масла, также ушла с рынка фирма-изготовитель объемных элементов в названном фильтре. В систему очистки масла был включен самоочищающийся сепаратор СЦ-1.5, за ним последовательно в освободившиеся корпуса – объемный фильтр Winslow и фильтроэлемент на бумажной основе. В этом случае по результатам регулярных химических и спектрографических анализов масла (через 1 000 ч) смена масла и очистка циркуляционной цистерны выполнялась через 5–8 тыс. ч. Суточный расход масла на угар составлял 40–50 кг/сут, удельный паспортный расход масла на номинальной мощности задан на уровне 0,7–1,0 г/(кВт·ч), или в массовом выражении 37–53 кг/сут.

Первая проверка состояния поршневой группы танкера «Георгий Фройер» при эксплуатации с рекомендованными нагрузками, на более легких сортах топлива и с применением комбинированной системы очистки циркуляционного масла [6], была выполнена после наработки 22 672 ч (цилиндры № 7, 8). При осмотре цилиндров обнаружены следы хонингования на всей поверхности цилиндрических втулок, включая верхнюю часть, где рисунок просматривался на фоне гладкой поверхности. Поршневые кольца в хорошем состоянии, нагаров на тыльной стороне практически нет, тронк поршня чистый.

Радиальный износ первого поршневого кольца составил 0,2 мм по толщине без потери упругости, сохранилось хромирование.

Второе кольцо имело износ до 0,1 мм, на третьем кольце износ не отмечался. Кромки маслосъемных колец изнашивались по ширине на 0,1 мм. Ресурс поршневых колец не выработан. В канавке первого кольца зазор увеличился на 0,04 мм, или 16 % от предельно допустимого износа. Во вторых канавках увеличение зазора до 0,01–0,03 мм. В третьей канавке износ не зафиксирован. В канавках маслосъемного кольца увеличение зазора составило 0,02 мм.

Анализ износных показателей ЦПГ представлен на гистограмме (рис. 2).

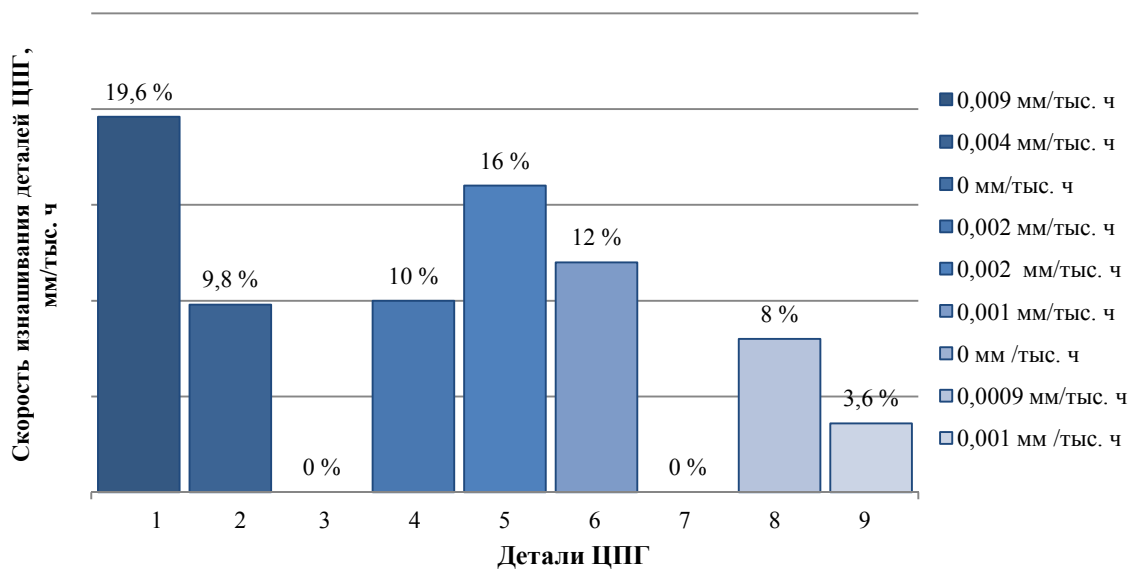


Рис. 2. Процент допустимого износа и скорость изнашивания деталей ЦПГ главного двигателя танкера «Георгий Фройер» (первая ревизия, наработка 22 672 ч): 1–9 (см. рис. 1)

К очередному доковому ремонту (через два года) двигатель отработал 25 318 ч.

Во время ревизии ЦПГ были заменены первые кольца на цилиндрах № 3, 5, 9 по причине снижения упругих свойств. Остальные кольца сохранили свою работоспособность и оставлены для дальнейшей работы. К следующему доковому ремонту двигатель отработал 40 086 ч. По результатам регулярных проверок интегральной плотности камеры сгорания цилиндров, а также контроля состояния хона на зеркале и обмера цилиндрических втулок в период ревизии клапанов газораспределения комплект сохранял высокую работоспособность без заметного увеличения расхода масла и при допустимом содержании продуктов износа в масле.

Учитывая хорошее состояние поршневой группы, моточистка была проведена только на цилиндрах № 1, 2, 4, 6, которые отработали с постройки 40 086 ч без ревизии. При этом первые кольца изнашивались по толщине в среднем на 6 %, или 0,61 мм, и заметно потеряли в упругости. Вторые поршневые кольца сохранили работоспособность и имели средний радиальный износ 0,18 мм. Третьи компрессионные кольца износа практически не имели. Маслоъемные кольца изнашивались в среднем на 0,35 мм и имели допустимую ширину маслоъемных кромок. По результатам дефектации были заменены первые кольца на всех названных цилиндрах и маслоъемные кольца на цилиндрах № 1, 6. Приращение в размерах втулок не зафиксировано. Коксования на кольцах не наблюдалось, что указывает на высокий запас моюще-диспергирующих свойств российского масла М-14-Д (цл 30). Зазоры в канавке первого кольца составили 0,35 мм, т. е. износ первых канавок достиг 48 %.

На основании положительного опыта эксплуатации, контроля и мониторинга состояния ЦПГ каждого цилиндра ревизия ЦПГ и замена поршневых колец производилась далее исключительно «по состоянию». Как известно, данный метод широко использовался на судах Министерства Морского флота совместно с системой планово-предупредительных осмотров и ремонтов.

В результате за 12 лет эксплуатации и наработке 64 500 ч (статистика на 2009 г.) было подвергнуто ревизии всего 15 поршней вместо плановых 48 с заменой 15 верхних колец, 8 вторых компрессионных колец, 6 колец № 3 и 10 маслоъемных колец, т. е. всего 39 колец вместо 194 по плановым ревизиям ЦПГ. Результаты дальнейшей успешной эксплуатации до наработки 77 000 ч приведены в табл. 2.

Моточистки и замены поршневых колец

Наработка двигателя, ч	Ремонт на класс, 22 672	Доковый ремонт, 25 318	Доковый ремонт, 40 086	45 700	Ремонт на класс, 52 400	59 100	Доковый ремонт, 60 000	68 700	Ремонт на класс, 74 000	Ремонт на класс, 77 000
№ цилиндра	Замененные кольца. Нарботка колец. Номера колец. Обозначение колец (К, №)									
1	–	–	К 1, 4. 40 086	–	–	–	–	–	–	К 1, 4. 36 500 К 2, 3. 77 000
2	–	–	К 1. 40 086	–	–	–	–	–	К 1. 31 700. К 2, 3, 4. 72 300	–
3	–	К 1. 25 318	–	–	–	–	К 1. 34 500 К 2, 3, 4. 60 000	–	–	К 1, 2, 3, 4. 16 600
4	–	–	К 1. 40 086	–	–	–	К 1, 4. 20 000 К 2. 60 000	–	–	К 3. 77 000 К 1, 2, 4. 16 700
5	–	К 1. 25 318	–	–	К 1, 27 400 К 2, 3, 4. 52 400	–	–	–	–	К 1, 2, 3, 4. 24 600
6	–	–	К 1, 4. 40 086	–	–	–	–	–	–	К 1, 4. 36 500 К 2, 3. 77 000
7	К 1, 2, 3, 4. 22 672	–	–	–	–	К 1, 2, 4. 36 400	–	–	–	К 3. 54 400 К 1, 2, 4. 17 400
8	К 1, 2, 3, 4. 22 672	–	–	–	К 1, 2, 3, 4. 29 500	–	–	–	–	К 1, 2, 3, 4. 24 600
9	–	К 1. 25 318	–	К 1, 2, 3, 4. 19 900	К 1, 2, 3, 4. Вне плана	–	–	–	–	К 1, 2, 3, 4. 31 300
Год	2000	2001	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010

В указанное время проходил ремонт дизеля на «Класс Регистра» с первой заменой поршней и, соответственно, поршневых колец.

Исключение составил только цилиндр № 9, где в результате обрыва тарелки выхлопного клапана в 2005 г. был заменен поршень с комплектом колец.

Как следует из анализа, эксплуатация дизеля 9L28/32A-F на режимах нагрузок, близких к экономическим (70–75 %) при удовлетворительном качестве тяжелого топлива и улучшенной очистке смазочного масла, позволила на танкере «Георгий Фройер» получить износные характеристики, существенно превышающие показатели танкера «Василий Клименко» на первоначальном этапе его эксплуатации (см. рис. 1). Также значительно превышены среднестатистические нормы, рекомендованные заводом-строителем (см. табл. 1).

При заданной нагрузке (около 75 % от номинальной) поршни отработали 77 тыс. ч и заменены только по причине износа в первой канавке.

Цилиндровые втулки подвергались ручному хонингованию при каждой ревизии цилиндра и заменены одновременно с поршнями через 77 тыс. ч, хотя имели еще 30 %-й запас ресурса.

В целом детали ЦПГ дизеля 9L28/32A-F проиллюстрировали высокие характеристики износостойкости и надежности даже при эксплуатации дизеля в тяжелых условиях, обусловленных режимом работы рассматриваемых танкеров. Главный двигатель с изобарной турбиной может нормально работать на гребной винт фиксированного шага только при высокой нагрузке и соответствующей этой мощности частоте вращения при заданной легкости винтовой характе-

ристики. Только в этом случае турбина получает достаточный секундный расход газа с соответствующей теплотой, достаточной для энергетического баланса «турбина – компрессор». Такие условия создаются только на морских переходах при удовлетворительных погодных условиях и нормальной гидродинамической легкости гребного винта, которые обеспечивают дизелю достаточное количество воздуха. В реальных же условиях настоящего времени данные танкеры заняты в основном бункеровками промысловых судов в море, во многих случаях на бакштовах в режимах тяжелых винтовых характеристик.

Согласно рекомендациям фирмы длительная работа дизеля по винтовой характеристике с винтом фиксированного шага допускается в диапазоне 58–100 % от номинальной мощности (рис. 3).

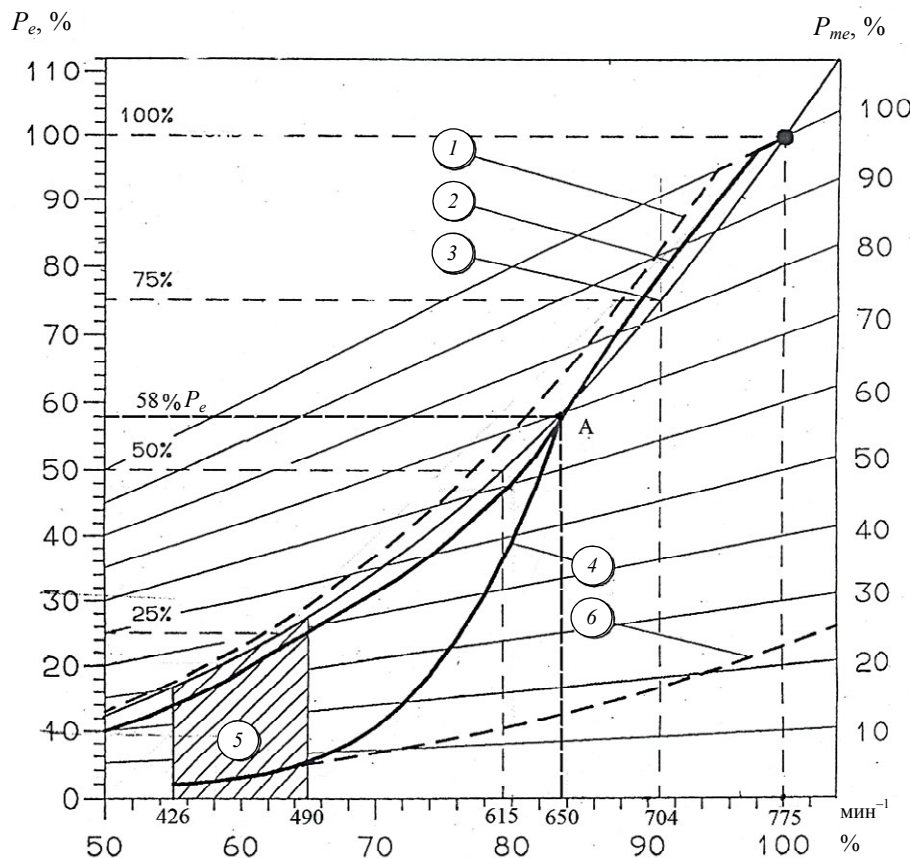


Рис. 3. Рекомендации фирмы по ограничению нагрузки (точка А) на режимах без винта регулируемого шага (ВРШ) до  $n = 640 \text{ об}^{-1}$ , при мощности 58 % от номинальной:

- 1 – предельная нагрузка для продолжительной допустимой работы;
- 2 – кривая ограничительной нагрузки; 3 – теоретическая номинальная винтовая характеристика;
- 4 – линия ограничения нагрузки при комбинаторном режиме с ВРШ (кривые 2 + 4);
- 5 – режимы холостого хода и нагрузки при включении муфты реверс-редуктора;
- 6 – теоретическая характеристика при нулевом шаге ВРШ

На остальных режимах воздухообеспечение может обеспечиваться только при наличии ВРШ. Этот фактор явился в дальнейшем наиболее трудным и затратным в эксплуатации дизелей, поскольку в условиях бункеровки на бакштовах и работе во льдах вместо требуемого облегчения винтовой характеристики на низких оборотах она увеличивается за счет роста сопротивлений движению судна.

На дизелях установлены турбокомпрессоры типа NR-26/R в изобарной схеме наддува. Анализ результатов стендовых испытаний дизеля 9L28/32A-F при работе по винтовой характеристике выявляет неэффективное воздухообеспечение на низких нагрузках.

Как следует из данных табл. 3, изобарная турбина обеспечивает наилучшее воздухообеспечение на номинальном режиме и достаточно удовлетворительное при нагрузках от 70 % мощности.

Стендовые параметры воздухообеспечения дизеля 9L28/32А-F

Параметры	Значение			
	25	50	75	100
Нагрузка, %	25	50	75	100
Удельный расход воздуха $l_e$ , кг/(кВт·ч), и % от номинального значения	7,2 88	7,64 93	8,05 98	8,22 100
Суммарный коэффициент избытка воздуха $\alpha_2$ и % от номинального значения	2,35 84	2,58 88	2,73 98	2,79 100
Отношение давления наддува $P_n$ к $P_{me}$ , %, и характеристическое отношение давления наддува к $P_{me}$	85,1 0,15	83,1 0,14	95,7 0,16	100 0,17
Удельный эффективный расход топлива, г/(кВт·ч)	224,5	210	198,5	200,0
Температура отходящих газов за турбиной $t_{T2}$ и ее приращение по отношению к номинальной мощности, °C	360 +55	380 +75	352 +47	305 +0
Температура отходящих газов за цилиндром $t_{ог}$ , °C	318	305	296	322

Соответственно, температура отходящих газов за турбиной даже в условиях идеального технического состояния дизеля на стенде превышает номинальное значение на 75 °C в режиме 50 % нагрузки. В действительности максимум температуры наблюдается в диапазоне нагрузок 30–40 %. В режиме холостого хода и минимальных нагрузок (с реверс-редуктором) за счет поршневого эффекта и отсутствия избыточного давления в продувочном ресивере создается вакуум. На пусках и в процессе прогрева газового тракта и подъема оборотов турбины до 2 000 мин<sup>-1</sup> в течение не менее 10 мин двигатель пугающе дымит, что приводит к резким конфликтам с административной портов. Дымление наблюдается и при смене режимов в процессе швартовок в портах.

В реальных условиях работы дизеля на рассматриваемых танкерах температура выхлопных газов за турбиной на малых оборотах дизеля в некоторых случаях и особенно при работе на бакштовах превышает 500 °C.

Высокие температуры газов вне цилиндра, достигающие 600 °C перед турбиной, приводят к прогоранию компенсаторов, перегреву выхлопных клапанов с потерей их плотности и возможным заеданиям в направляющих втулках, перегревам газовой турбины, деформациям, нарушениям геометрии в элементах проточной части, обгоранию лопаток соплового аппарата, трещинам в корпусе турбины и высокотемпературной коррозии в рабочих элементах [7]. Значительная деформация неохлаждаемых корпусов по мере ухудшения их геометрии приводит даже к заклиниванию соплового аппарата и невозможности установить одинаковые зазоры в сечениях элементов проточной части турбины.

По мере ухудшения воздухообеспечения дизелей турбоагнетатели или их корпуса после многочисленных безуспешных ремонтов на российских и корейских ремонтных предприятиях приходится заменять через 50–60 тыс. ч. Компенсаторы на газовыхлопных патрубках в целях безопасности вынуждены заменять через 35 000 ч.

Наиболее сложной проблемой в условиях высокой температуры газов оказалась работоспособность выхлопных клапанов. При хорошем техническом состоянии турбокомпрессора выхлопные клапаны отработывали до 16 000 ч без восстановительного ремонта. По мере ухудшения воздухообеспечения дизеля этот показатель постепенно снижался практически в 2–3 раза в зависимости от качества приобретаемых клапанов. Несмотря на постоянный контроль интегральной плотности камеры сгорания прибором ПИД, дважды происходило схватывание клапана в направляющей втулке с последующим разрушением деталей камеры сгорания и элементов привода всех четырех клапанов газораспределения.

Для преодоления проблемы недостаточного воздухообеспечения на низких нагрузках фирма предлагает использовать специальный турбоакселератор с сопловой системой (рис. 4).

Управление турбоакселератором производится автоматически. Давление нагнетаемого воздуха и подача впрыскивающего топливного насоса непрерывно контролируются системой. Если отношение давления и подачи топлива становится слишком низким, то включается в действие функция турбоакселерации.

В качестве рабочей среды турбоакселератора используется воздух, поставляемый от пневмосистемы двигателя. Сжатый воздух из воздушных баллонов через специальные сопла подводится на рабочее колесо компрессора, а его энергия резко повышает скорость вращения ротора компрессора и давление наддува. В результате уменьшается дымление и снижается задержка в наборе мощности двигателя.



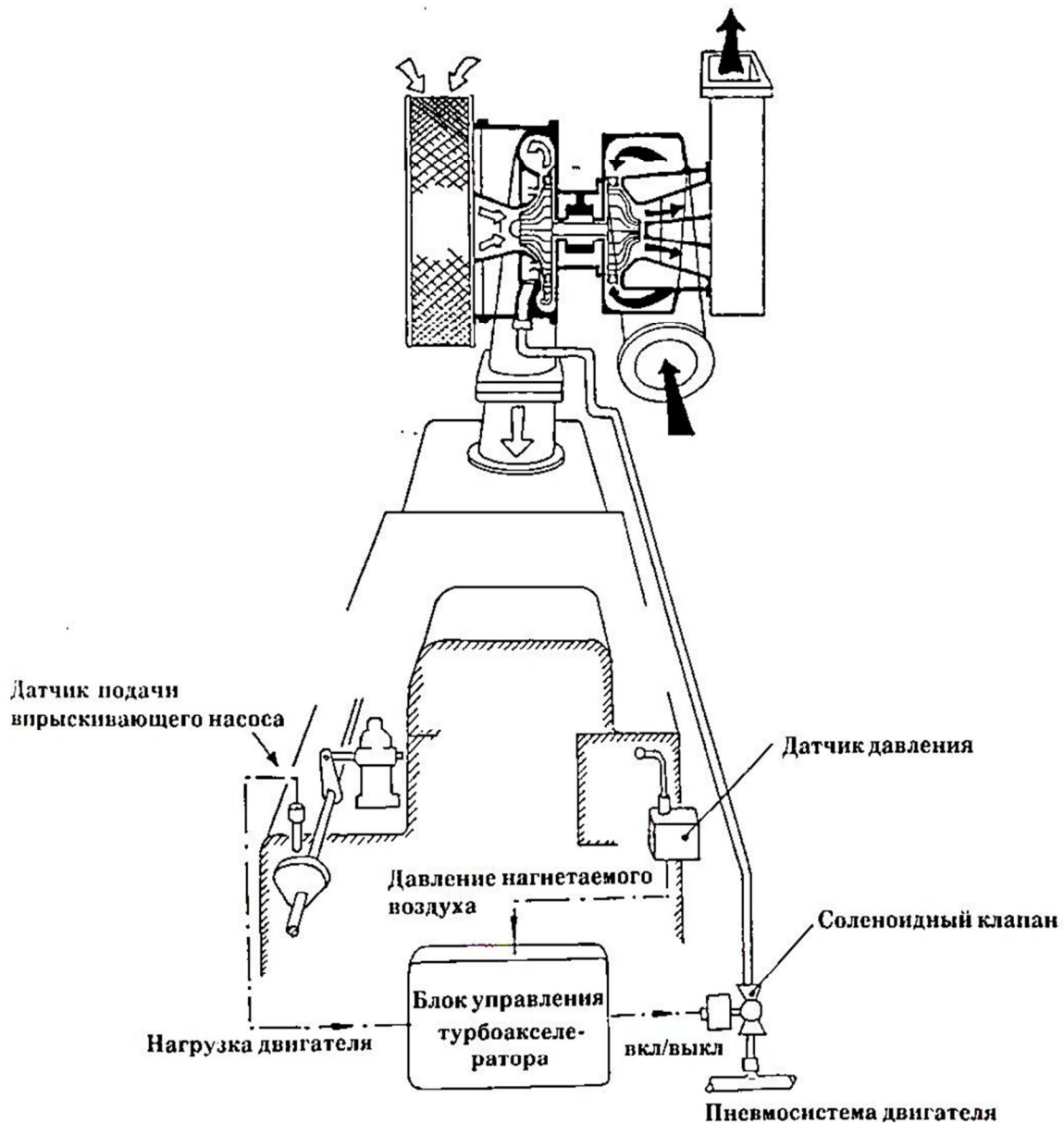


Рис. 4. Турбоакселератор

Данное существенное усложнение конструкции двигателя может быть результативным только при маневрировании и швартовых операциях в порту, если они будут не продолжительными и воздушные компрессоры при их малой производительности смогут обеспечить систему сжатым воздухом и таким образом позволят избежать конфликта с властями порта.

В морских условиях, где и происходит потеря работоспособности газотурбонагнетателя, эта система бесполезна. Даже исключая наиболее сложный и длительный режим работы на бакштовых, при плавании в штормовых, ледовых и других условиях по утяжеленным характеристикам двигатель не сможет выйти на режимы с удовлетворительным воздухообеспечением и допустимыми температурами отходящих газов.

В зависимости от назначения судна и условий его плавания для четырехтактного двигателя, работающего на винт фиксированного шага, более рациональным и надежным был бы вариант с импульсной турбиной и преобразователями импульсов.

Разумеется, использование винта регулируемого шага могло бы полностью исключить проблемы с работоспособностью элементов газовой системы, равно как и при работе двигателя по нагрузочной характеристике в качестве дизель-генератора.

Как известно, высокие температуры отработавших газов в дизелях с турбонаддувом отображают тепловое состояние рабочего тела вне цилиндра. Они зависят в основном от суммарного коэффициента избытка воздуха и не определяют тепловую напряженность ЦПГ.

Удельный тепловой поток и, соответственно, тепловая напряженность ЦПГ подчиняются зависимости

$$q = B a_w \frac{P_{me} n}{\eta_e},$$

где  $B$  – константа конкретного двигателя. Таким образом,  $q$  зависит в основном от функции мощности двигателя ( $P_{me}n$ ) с учетом эффективного КПД ( $\eta_e$ ) и доли теплоты, отдаваемой поверхностям нагрева ( $a_w$ ). По данным стендовых испытаний эффективный КПД по отношению к номинальному значению уменьшается примерно на 5–6 % при нагрузке 50 % от номинальной мощности и не более 10 % при нагрузке 0,3  $P_{en}$ . Из этого следует, что и  $\eta_e$ , а также  $a_w$  не могут существенно повлиять на закон повышения плотности теплового потока. Поскольку неудовлетворительное воздухообеспечение и наиболее высокие температуры наблюдаются при указанных малых мощностях, значительного роста плотности теплового потока на деталях ЦПГ не будет. Как следствие, ухудшения в работе поршневого комплекта с трещинами и выгораниями на деталях камеры сгорания и даже коксования масла в районе верхних поршневых колец не наблюдается.

### Обсуждение основных результатов

К настоящему времени оба дизеля отработали более 100 тыс. ч.

Капитальных ремонтов с выемкой, перешлифовкой шеек и даже с коррекцией расцепов коленчатого вала не производилось. Мотылевые и рамовые подшипники канавчатого типа Rillennlager фирмы MIBA отработывали заданные 30–35 тыс. ч без существенных повреждений и заменялись в основном при значительном запасе ресурса [8].

В современных среднеоборотных дизелях требуется регулярная проверка геометрии яблочка шатуна при ревизии поршней. При сборке мотылевого подшипника необходимо обеспечить правильное обжатие без перегрузки зубчатого разьема подшипника. По результатам магнитной дефектоскопии на корейском судоремонтном предприятии были заменены 8 шатунов по причине обнаружения микротрещин на корнях зубьев. Контрольная проверка на российском судоремонтном заводе не выявила указанных дефектов.

Недостаточной оказалась работоспособность кулаков газораспределения и топливного насоса. Частые натирывания приходилось вручную шлифовать. В результате на одном двигателе после 60 тыс. моточасов (при плановой наработке 50 тыс. ч) были заменены секции распределительного вала.

Ресурс плунжерных пар в 18 000 ч явно превышен. Во избежание ухудшения параметров процесса топливоподачи и частых замен плунжерных пар, как это отмечалось на танкерах в Приморском морском пароходстве.

На дизелях компании «Дельта» успешно применялся их восстановительный ремонт по технологии пористого хромирования на российских предприятиях. Как доказал опыт эксплуатации, хромированные плунжеры имеют высокие ресурсные показатели.

### Выводы

1. На основе проведенного анализа можно утверждать, что при грамотной эксплуатации дизели 9L28/32A-F, помимо их достоинств в плане удобного и поэтому нетрудоемкого обслуживания, обеспечивают, в целом, высокие ресурсные показатели.

2. При нагрузке дизелей около 75 % от номинальной мощности с использованием тяжелого топлива в пределах рекомендованных фирмой показателей и вязкости не выше 180  $\text{с}^{-1}$  достигаются надежность, работоспособность и высокие ресурсные показатели триады трения «цилиндровая втулка – поршневые кольца – канавки поршней» и, следовательно, периоды между техническим обслуживанием цилиндров по максимуму до 40 тыс. ч.

3. Поршневые кольца сохраняют работоспособность: компрессионные № 1, 2 и маслоъемное – до 40 тыс. ч, кольцо № 3 с комбинированными функциями – до 70 тыс. ч.

4. Поршневые канавки первого кольца могут выработать свой заданный износный ресурс 0,25 мм за 60 тыс. ч.

5. За 90 тыс. ч эксплуатации не было случаев непосредственного отказа или повреждения цилиндровых крышек, втулок или поршней.

6. Нормальное воздухообеспечение двигателя без сильного дымления и запредельных температур отходящих газов на режимах от холостого хода до нагрузки  $0,58 P_{e \text{ ном}}$  с изобарной турбиной возможно только при работе двигателя на винт регулируемого шага.

7. Четырехтактный двигатель с числом цилиндров 9 не обладает полной внешней уравновешенностью по моментам сил инерции.

8. Очевидно, по этой причине от вибрационных нагрузок на одном из двигателей произошла самоотдача специального, не доступного для контроля крепления промежуточной шестерни, распределительного вала. Шестерня сорвалась, выйдя из зацепления без повреждения контактирующих элементов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конкс Г. А. Мировое судовое дизелестроение. Концепции конструирования, анализ международного опыта: учеб. пособие. М.: Машиностроение, 2005. 512 с.
2. Возницкий И. В. Судовые двигатели внутреннего сгорания. СПб.: Моркнига, 2007. 285 с.
3. Конкс Г. А. Поршневые ДВС. Современные принципы конструирования: учеб. пособие. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2006. 560 с.
4. Возницкий И. В. Современные судовые среднеоборотные двигатели: учеб. пособие. СПб., 2003. 136 с.
5. Проектное рук-во пропульсивной системы L28/32F-VO. MAN B&W. 184 с.
6. Возницкий И. В. Практические рекомендации по смазке судовых дизелей // Библиотека судового механика. СПб., 2002. 132 с.
7. Кучеров В. Н. Анализ результатов эксплуатации дизелей типа L28/32A-F и D2842LE фирмы MAN B&W и MAN // Водные пути России: строительство, эксплуатация, управление. СПб.: Изд-во СПГУВК им. адм. С. О. Макарова, 2009. С. 352–354.
8. Кучеров В. Н. Особенности рабочего процесса, эксплуатация и ресурсные возможности современных дизелей // Вестник Тихоокеан. гос. ун-та. 2013. С. 66–69. URL: <http://pnu.edu.ru/ru/vestnik/about/> (дата обращения: 01.10.2019).

Статья поступила в редакцию 17.12.2019

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Кучеров Владимир Никанорович** – Россия, 690059, Владивосток; Морской государственный университет им. адмирала Г. И. Невельского; канд. техн. наук; профессор кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания; [Nadezkin@msun.ru](mailto:Nadezkin@msun.ru).



### OPERATION MODES AND DURABILITY OF 9L28/32A-F MAN-B&W DIESELS DURING LONG SERVICE

**V. N. Kuchеров**

*Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoy,  
Vladivostok, Russian Federation*

**Abstract.** The article describes L28/32 and L23\30 MAN-B&W diesel engines widely used by many shipping companies owing to high maintenance and service ability of simple, but sufficiently reliable engine parts. As for a medium speed 4-stroke engine, diesels have optimal power forcing characteristics, high fuel saving and durable overhaul time for essential parts. There have been considered the positive and negative features of the engine, which are also important technical indica-

tors, in comparison with the designed samples when choosing the base engine. The analysis of operational durability, the typical failures of the cylinder-piston group and other essential parts of 9L28/32A-F MAN B&W engines under different operation modes and loads have been given. During the first overhaul there has been demonstrated the working state of the cylinder-piston group of two engines after 22424 and 22672 h instead of recommended 12000 h for heavy fuel oil. Owing to diagnostic control and monitoring cylinder liner and piston rings assembly, overhauling was made only by condition mode. Maximum working time (40084 h) without cylinder overhaul was reached at suspend power of 75%  $P_{e\text{nom}}$ . At a tanker «Georgiy Froier» during 12 years of operation and 64500 working hours only 15 pistons were overhauled instead of 48 recommended, with changing 39 piston rings instead 194 recommended. In the future, the engines worked up to 100 thousand hours without top overhaul, with high resource parameters of the main parts on two engines in the shipping company. The operational problems of the engines with isobaric boost system on ships with a fixed-pitch propeller were identified and considered.

**Key words:** marine diesel, cylinder liner, piston, piston rings, wear, piston overhaul, resource characteristics, air supply, diesel operation mode, gas temperature.

**For citation:** Kucherov V. N. Operation modes and durability of 9L28/32A-F MAN-B&W diesels during long service. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2020;1:94-105. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-1574-2020-1-94-105.

#### REFERENCES

1. Konks G. A. *Mirovye sudovoe dizelestroenie. Konceptii konstruirovaniya, analiz mezhdunarodnogo opyta: uchebnoe posobie* [World marine diesel manufacturing. Design concepts, analysis of international experience: teaching aids]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005. 512 p.
2. Voznickij I. V. *Sudovye dvigateli vnutrennego sgoraniya* [Marine internal combustion engines]. Saint-Petersburg, Morkniga Publ., 2007. 285 p.
3. Konks G. A. *Porshnevye DVS. Sovremennye principy konstruirovaniya: uchebnoe posobie* [Reciprocating internal combustion engines. Modern principles of design: tutorial]. Habarovsk, Izd-vo Tihookeanskogo gosudarstvennogo universiteta, 2006. 560 p.
4. Voznickij I. V. *Sovremennye sudovye sredneoborotnye dvigateli: uchebnoe posobie* [Modern marine medium-speed engines: tutorial]. Saint-Petersburg, 2003. 136 p.
5. *Proektnoe rukovodstvo propul'sivnoj sistemy L28/32F-VO* [Design manual of propulsive system L28/32F-VO]. MAN B&W. 184 p.
6. Voznickij I. V. *Prakticheskie rekomendacii po smazke sudovyh dizelej* [Practical recommendations for lubrication of marine diesel engines]. *Biblioteka sudovogo mekhanika*. Saint-Petersburg, 2002. 132 p.
7. Kucherov V. N. *Analiz rezul'tatov ekspluatatsii dizelej tipa L28/32A-F i D2842LE firmy MAN B&W i MAN*. [Analysis of operation results of L28 / 32A-F and D2842LE MAN B&W and MAN diesel engines]. *Vodnye puti Rossii: stroitel'stvo, ekspluatatsiya, upravlenie*. Saint-Petersburg, Izd-vo SPGUVK im. adm. S. O. Makarova, 2009. Pp. 352-354.
8. Kucherov V. N. *Osobennosti rabocheho processa, ekspluatatsiya i resursnye vozmozhnosti sovremennyh dizelej* [Characteristics of working process, operation and life capabilities of modern diesel engines]. *Vestnik Tihookeanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2013, pp. 66-69. Available at: <http://pnu.edu.ru/ru/vestnik/about/> (accessed: 01.10.2019).

The article submitted to the editors 17.12.2019

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Kucherov Vladimir Nikanorovich** – Russia, 690059, Vladivostok; Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoy; Candidate of Technical Sciences; Professor of the Department of Ship Internal Combustion Engines; [Nadezkin@msun.ru](mailto:Nadezkin@msun.ru).

