

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-409-418

FUEL PHYSICAL PARAMETERS INFLUENCE ON PLUNGER PAIRS WEAR OF HIGH PRESSURE FUEL PUMPS

D. E. Belov, A. V. Ivanovskaya

Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Russian Federation

When choosing marine fuel, cost rather than quality is often the priority. This is justified by the presence of a fuel-processing system on the ship. Bunkering with low-quality fuel afterwards negatively affects the condition of the fuel equipment. Such equipment includes a high-pressure fuel pump, which is designed for metering fuel and controlling the loading degree of entire diesel engine. According to the statistics, about 75 % of high-pressure fuel pumps become unusable due to wear of the plunger pairs. Therefore, research of their wear causes when operating on heavy fuel is an urgent task. The research results of plunger pair state for marine diesel engines of the Hyundai Himsem H21 / 32 type, which is a four-stroke engine with gas turbine supercharging, effective power of 1860 kW, and used on ships as a drive for diesel generators, are presented in the paper. The reason for a thorough and detailed study was the inability to start a diesel engine after its continuous operation for 2800 hours at an average load of 45 %, followed by its shutdown. The grade of fuel used during this period is RMK 500 (ISO — 2041F 2010/12). For experimental confirmation of wear, high-pressure fuel pumps with new plunger pairs are installed on a diesel engine in sequence through one cylinder, i. e. the odd-numbered cylinders are fitted with pumps with new plunger pairs, the even ones are left worn out. At the same time, an uneven distribution of the exhaust gases temperature is observed over the even and odd cylinders. In addition, analysis of the fuel has showed the increased value of aluminosilicates and mechanical impurities even after separation. In the work it is shown that the presence of impurities in the fuel is the main reason for the destruction of the plunger pairs.

Keywords: fuel pump, high-pressure pump, plunger pair, wear, abrasive, plunger, fuel, filtration, cleaning, ship industry.

For citation:

Belov, Dmytrii E., and Aleksandra V. Ivanovskaya. "Fuel physical parameters influence on plunger pairs wear of high pressure fuel pumps." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.3 (2021): 409–418. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-409-418.

УДК 621.31

ВЛИЯНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТОПЛИВА НА ИЗНОС ПЛУНЖЕРНЫХ ПАР НАСОСОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Д. Е. Белов, А. В. Ивановская

ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет»,
Керчь, Российская Федерация

В работе приведены доказательства того, что при выборе судового топлива зачастую приоритетным является его стоимость, а не качество, что аргументировано наличием на судне системы топливообработки. Подчеркивается, что бункеровка некачественным топливом впоследствии негативно сказывается на состоянии топливной аппаратуры и топливного насоса высокого давления, отвечающего за дозирование топлива и степень нагрузки дизеля в целом. Как показывает статистика, порядка 75 % топливных насосов высокого давления приходят в негодность из-за износа плунжерных пар. Поэтому исследование причин их износа при работе на тяжелом топливе является актуальной задачей. В статье приведены результаты исследования состояния плунжерной пары судовых дизелей типа Hyundai Himsem H21/32, представляющих собой четырехтактный двигатель с газотурбинным наддувом эффективной мощностью $N_e = 1860$ кВт, используемых на судах в качестве привода дизель-генераторов. Отмечается,

что причиной тщательного и детального исследования является отсутствие возможности запуска дизеля после его непрерывной работы в течение 2800 мото-ч на средней нагрузке, равной 45 %, с последующей его остановкой. В этот период используемая марка топлива — RMK 500 (ISO-2041F 2010/12). Для экспериментального подтверждения износа на дизеле были установлены топливные насосы высокого давления с новыми плунжерными парами в приведенной последовательности: к нечетным цилиндрам установлены насосы с новыми плунжерными парами, а у четных оставлены изношенные. При этом наблюдалось неравномерное распределение температуры выпускных газов по четным и нечетным цилиндрам. Кроме того, анализ топлива показал повышенное значение алюмосиликатов и механических примесей даже после сепарации. В работе показано, что именно наличие примесей в топливе является главной причиной разрушения плунжерных пар.

Ключевые слова: топливный насос, ТНВД, плунжерная пара, износ, абразив, плунжер, топливо, фильтрация, очистка, судовая промышленность.

Для цитирования:

Белов Д. Е. Влияние физических показателей топлива на износ плунжерных пар насосов высокого давления / Д. Е. Белов, А. В. Ивановская // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 3. — С. 409–418. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-409-418.

Введение (Introduction)

Практика эксплуатации судовых энергетических установок показывает, что в среднем 75 % топливных насосов высокого давления (ТНВД) приходят в негодность именно из-за износа плунжерных пар ввиду затрудненного пуска двигателя, неустойчивой работы, потери цилиндровой мощности при повышении нагрузки (характерно для судовых дизель-генераторов) [1]. Поэтому изучение причин износа прецизионных пар на сегодняшний день является актуальной задачей.

В настоящее время существуют методики теоретического прогнозирования состояния плунжерных пар в ТНВД, а также математического моделирования их износа. [2]. Однако для подтверждения таких моделей лучше опираться на данные, полученные опытным и экспериментальным путем, поскольку они всегда помогают производителям любых агрегатов вносить какие-либо изменения в технологию их производства, а также проводить разработку мероприятий по улучшению качества выпускаемого оборудования, в частности ответственных агрегатов для судовой энергетики.

Целью работы является исследование состояния плунжерных пар насосов высокого давления при работе на тяжелом топливе с наличием в его составе химических и механических примесей.

Методы и материалы (Methods and Materials)

На сегодняшний день методы диагностики состояния топливных насосов можно разделить на две группы. К первой группе относятся методы проверки состояния без полной разборки насоса. К наиболее распространенному способу оценки состояния плунжерной пары относится диагностика по параметрам давления в трубке высокого давления (ТВД) от ТНВД до форсунки, по параметрам вибрации ТВД от форсунок. Однако на практике это усложняет диагностику, так как данный метод применим только при износах выше предельно-допустимых значений, когда давление в нагнетательной части насоса не повышается до значений начала впрыска топлива через форсунку в цилиндры двигателя [3].

Существует также возможность математического определения производительности насосов высокого давления, исходя из давления нагнетания топлива. С момента начала открытия распылителя форсунки (начала подъема иглы) и до момента завершения нагнетания (возврат иглы в исходное положение) наблюдается расход топлива, вытекающего через распылительные отверстия площадью F . Применительно к впрыснутому объему топлива dV , вытекающему в течение промежутка времени dt , в этом случае выражение будет иметь следующий вид:

$$dV = \mu F \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_{\phi} - P_{\text{и}})} d\tau, \quad (1)$$

где μ — расходный коэффициент; P_{ϕ} — давление смеси в форсунке; $P_{ц}$ — давление топливной смеси в цилиндре двигателя.

При наличии точного значения расходного коэффициента расчетный метод позволяет достаточно точно определить объем топлива на выходе из плунжерной пары ТНВД и сопоставить его со значениями, полученными экспериментальным путем.

Ко второй группе относятся методы, требующие установки ТНВД на специализированный стенд типа КИ-15711, а также полной разборки ТНВД и проведения их полной дефектации. Последний метод дефектации дает подробную картину состояния плунжерной пары и агрегата в целом. Последующие результаты исследования состояния плунжерной проводились для судовых дизелей типа Hyundai Himsem H21/32. Данный дизель представляет собой четырехтактный двигатель с газотурбинным наддувом эффективной мощностью $N_e = 1860$ кВт, используемый на судах в качестве привода дизель-генераторов.

Причиной тщательного и детального исследования является отсутствие возможности запуска дизеля после его непрерывной работы в 2800 мото-ч на средней нагрузке, равной 45 %, с последующей его остановкой. Для более детального анализа рассмотрим состояние некоторых элементов системы топливоподачи и подготовки данного двигателя, а также состав топлива с усредненными физико-химическими показателями, полученными из специализированной лаборатории FOBAS® (табл. 1). Марка используемого топлива в настоящее время RMK 500 (ISO — F 2010/12) [4].

Таблица 1

Физико-химические показатели топлива

Плотность	кг/л	1,0049
Вязкость при 50 °С	сСт	370,1
Сера	%	2,37
Температура вспышки	°С	>70
Зольность	%	0,061
Низшая теплота сгорания	МДж/кг	40,18
Температура помутнения	°С	6
Температура сепарации	°С	96
Температура после подогревателя	°С	134

В табл. 2 приведены показатели механических примесей данного топлива до и после сепарации.

Таблица 2

Показатели примесей топлива

Механические примеси	H ₂ O, %	Al + Si, мг/кг	Wa, мг/кг	Ig, мг/кг	Ni, мг/кг	Ph, мг/кг	Mg, мг/кг
До сепарации	0,18	57	149	26	36	6	2
После сепарации	0,08	17	96	23	29	5	2

Исходя из показателей, представленных в табл. 2, отмечено повышенное среднестатистическое значение алюмосиликатов топлива ($Al + Si > 16$ (мг/кг)), повышенное содержание механических примесей ($> 0,1$ %), а также Ph и Wa > 40 (мг/кг) для данных типов дизелей [5]. При непрерывной работе дизеля выполнялся плановый осмотр с промывкой следующих агрегатов. Периодичность указана в табл. 3.

Таблица 3

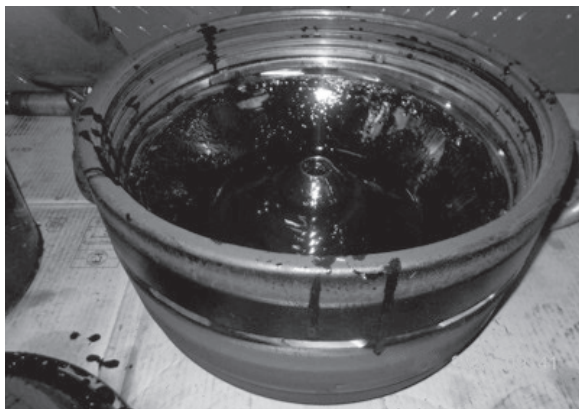
Периодичность плановых осмотров

Осмотр, промывка топливного сепаратора	Каждые 800 мото-ч
Промывка фильтров ТО	240 мото-ч
Промывка фильтров грубой очистки	480 мото-ч
Промывка фильтров ТО на дизеле	168 мото-ч
Проверка вискозиметра	720 мото-ч

Примечание. ТО — тонкая очистка.

Каждые 800 ч производилась остановка и последующая промывка проточной части сепаратора марки Westfalia OSD 0211 — рис. 1. Инспекция показала наличие внутри проточной части вязкой клейкой субстанции и следов парафина даже при соблюдении точной температуры сепарирования во избежание появления воска (96 °С).

а)



б)

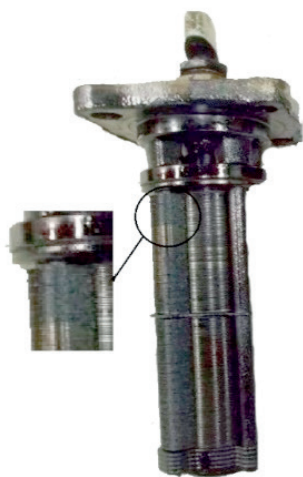


Рис. 1. Проточная часть сепаратора Westfalia OSD 0211:

а — нижняя часть барабана и пакет тарелок с отложениями шлама (асфальтены, парафины, воск);
б — отложения шлама в зазоре между нижней и верхней частями барабана сепаратора

При промывке сепарирующих тарелок и барабана применялись специальные химические агенты, так как промывка дизельным топливом не давала надлежащего эффекта. Следует отметить, что для улучшения качества топлива и повышения эффективности сепараторы были включены на параллельную работу. Однако при этом возникла необходимость вскрыть проточную их часть для чистки раньше планируемого периода из-за значительного снижения производительности (от номинальной, равной 2600 кг/ч, до 1200 кг/ч).

а)



б)

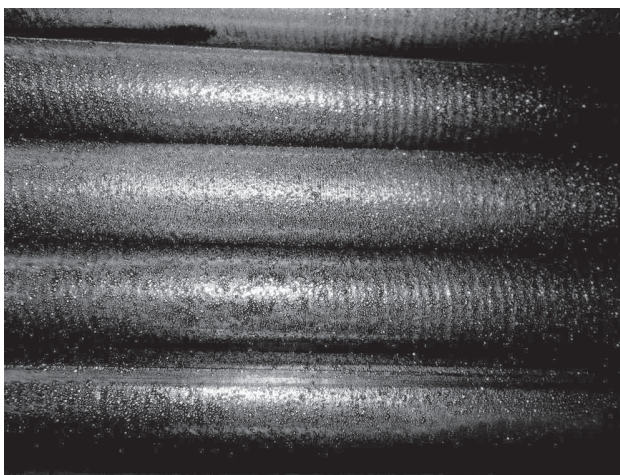


Рис. 2. Состояние фильтров тонкой очистки:

а — фильтр в сборе; б — фильтрующие элементы после 2800 мото-ч работы

Плановая проверка состояния фильтров тонкой очистки (рис. 2) показала наличие мелких твердых абразивных частиц на поверхности фильтров, а также большая часть фильтра была покрыта вязкой клейкой пленкой. Даже при незначительном загрязнении фильтра разность давлений на входе и выходе топлива из фильтра оказывалась значительной для срабатывания сигнализации в МКО (машино-котельном отделении). При вскрытии фильтра было выявлено наличие тонкой

клеякой пленки по составу, близкому к силикону и воску. Нормальное давление на входе составляет $8,9 \text{ кг/см}^2$, на выходе — $7,5 \text{ кг/см}^2$ [6]–[7]. Для дизеля, вращающего генератор переменного тока, значение давления в $5,5 \text{ кг/см}^2$ становится критическим и при большой нагрузке система защиты может отключить некоторые вторичные потребители от сети генератора для недопущения его полной остановки.

Основными причинами затрудненного пуска дизельного двигателя, из-за неполадок в топливной системе, могут быть следующие: пониженная температура и вязкость топлива на входе в двигатель, нарушение герметичности в системе нагнетания, неисправность регулятора частоты вращения, заклинивание плунжерной пары одного из насосов высокого давления, критический износ плунжерной пары и т. д. Схема дефектации и предельные значения износов для ТНВД данного типа приведены на рис. 3.

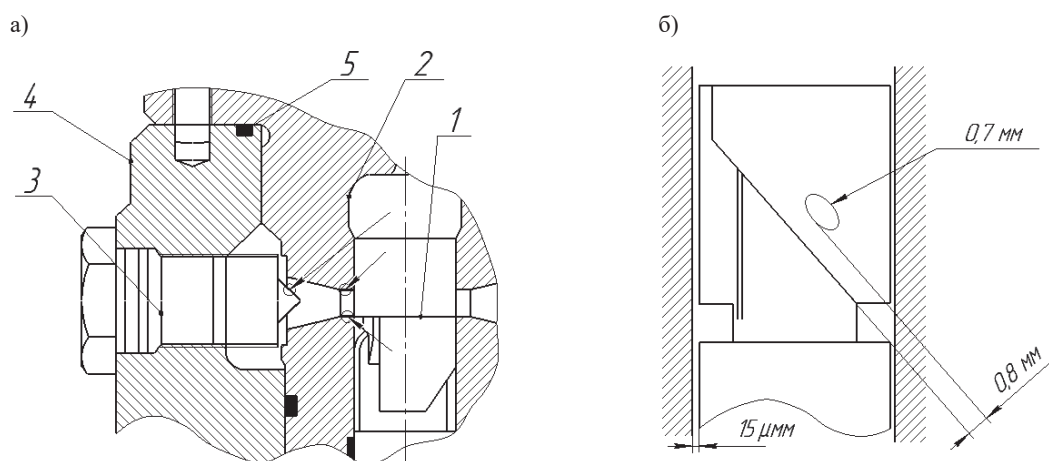


Рис. 3. Схема дефектовки (а) и предельные браковочные размеры (б) плунжерной пары ТНВД:
1 — плунжер насоса; 2 — плунжерная втулка; 3 — дефлектор;
4 — корпус насоса; 5 — уплотнительные кольца

На рис. 3 (слева) стрелками указаны места контроля состояния поверхностей при плановом осмотре ТНВД. Так как насосы высокого давления работают с подпором топлива, на входе в ТНВД всегда образуется повышенное давление рабочей смеси. Поэтому с целью предотвращения эрозионных разрушений всасывающих и отсечных отверстий устанавливают дефлекторы. При осмотре состояния дефлектора следует обратить внимание на состояние его средней части, а также носовой, в месте его примыкания к всасывающему отверстию во втулке. При осмотре дефлектора на нем проверяют наличие мелких задиrow и выбоин. При отсутствии каких-либо дефектов дефлекторы подлежат замене каждые 32000 мото-ч [8], [9].

Состояние плунжеров также проходит проверку. Причем на кромках его нагнетательной части не должно быть каких-либо задиrow и эрозионных «пятен». При наличии явных эрозионных пятен плунжер подвергается замерам, так как диаметр пятна не должен превышать 0,7 мм [10]–[12]. После тщательного осмотра состояния всех систем дизель-генератора был произведен полный осмотр топливных насосов высокого давления. На рис. 4 приведены результаты проверки состояния плунжерных пар после остановки дизель-генератора. При разборке ТНВД явных дефектов обнаружено не было, заклинивания и следы недостаточной смазки отсутствовали. Однако на нагнетательной части плунжеров (рис. 4) были видны следы эрозионного и химического воздействия топлива и его составляющих на поверхность плунжера. Средний размер диаметра пятна составлял 18 мм, что превышает допустимое отклонение. На поверхности плунжера также были обнаружены задиры, мелкие царапины, а под нагнетательной частью плунжера высветленный металл. В судовых условиях внутреннее состояние втулки ТНВД оценить сложно, однако видно, что она подверглась значительной полировке зеркала (можно определить визуально).

а)



б)



Рис. 4. Состояние плунжерных пар при работе на топливе RMK500 длительностью 2800 мото-ч:
а — общий вид плунжерных пар; б — эрозионные пятна на поверхности плунжера

При исследовании проблемы разрушения плунжерных пар было установлено, что главной причиной их разрушения явилось наличие механических примесей в используемом топливе, а именно наличие алюмосиликатов (Al_2O_3 и SiO), которые попадают в топливо при каталитическом крекинге [13]–[15].

Результаты (Results)

Демонтаж ТНВД не производился, поскольку общая продолжительность работы дизеля составляла 16200 мото-ч и поэтому попадание в проточную часть абразива вследствие промывки или очистки можно исключить. Для математического обоснования вероятности износа плунжерных пар рассмотрим методику, предложенную А. П. Ухановым [3]. Исходя из максимальной пропускной способности автоматического фильтра тонкой очистки, установленного перед двигателем (18 мкм), примем размер абразивной частицы, равным 10 мкм. Предположим, что абразивное зерно кремния будет внедряться в плунжер и втулку плунжерной пары одновременно, закрепляясь на одной из поверхностей и прорезая канавку на другой поверхности при движении (рис. 5). В данном случае появляется возможность определить объем вытесненного материала от внедрения абразивной частицы.

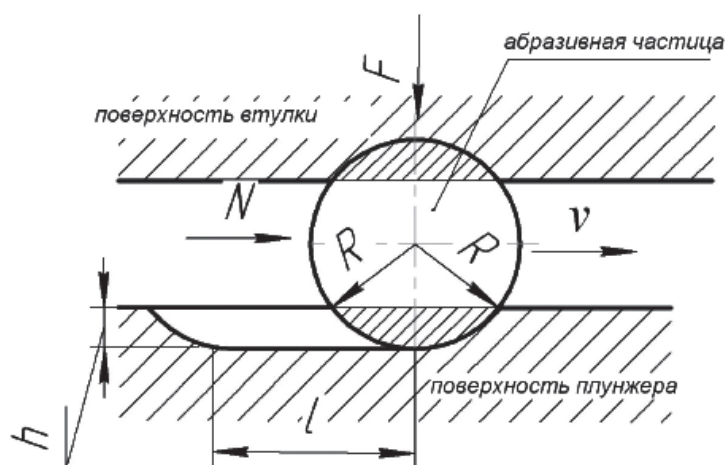


Рис. 5. Схема определения объема вытесненного материала при образовании царапины на поверхности при движении:

h — глубина внедрения частицы кремния; l — ее путь; F — сила, действующая на эту абразивную частицу при сжатии втулки и плунжера; N — сила, действующая на абразивную частицу, возникающая при движении плунжера с определенной скоростью v ;
 R — радиус абразивной частицы

Объем вытесненного материала, м^3 , при образовании царапины на поверхности трения составляет

$$V = Sh_{\text{тр}}, \quad (2)$$

где S — площадь сегмента окружности вытесненного участка частицей, м^2 ; $h_{\text{тр}}$ — путь трения, м .

Площадь сегмента окружности от внедрения частицы

$$S = 2R^2 \sqrt{2 - \sqrt{2 + 2\sqrt{1 - \frac{2Rh - h^2}{R^2}}} - (R - h)\sqrt{2Rh - h^2}}, \quad (3)$$

где R — радиус частицы, м ; h — глубина внедрения частицы, м .

Так как глубина внедрения, м , абразивной частицы будет зависеть от зазора и радиуса попавшей в зазор частицы, можно упростить выражение (3):

$$h = R - \frac{\delta}{2}, \quad (4)$$

где δ — зазор между плунжером и втулкой без учета влияния давления на данную втулку, м .

Подставив в выражение (3) вместо h выражение (4), получим новое выражение площади сегмента окружности S , м^2 , вида

$$S = 2R^2 \sqrt{2 - \sqrt{2 + \frac{\delta}{R}}} - \frac{\delta}{2} \sqrt{R^2 - \frac{\delta^2}{4}}. \quad (5)$$

Диаметр d абразивного зерна, попавшего в зазор, будет зависеть от величины зазора, образовавшегося между плунжером и втулкой δ . При таком вычислении предположительно величина зазора равна 8 мкм (по данным завода-изготовителя). Для расчета выражения (3) примем зазор между втулкой и плунжером постоянной величиной.

Обсуждение (Discussion)

Подставив значения диаметров зерна абразива (в рассматриваемом случае — зерна кремния) получим теоретическую зависимость площади сектора износа от величины зерна, исходя из предположения, что абразивная частица имеет большую твердость, чем у металла, из которого изготовлен плунжер (рис. 6).

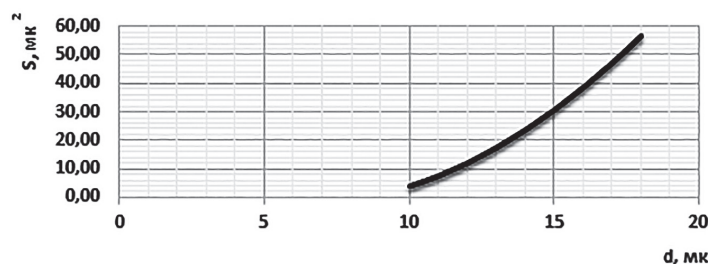


Рис. 6. Зависимость площади износа от диаметра абразивной частицы

Данные результаты расчетов справедливы для износа, вызванной одной абразивной частицей. Следовательно, количество абразивных частиц будет прямо пропорционально площади износа. Чтобы окончательно подтвердить износ плунжерных пар ТНВД, на дизеле были установлены топливные насосы высокого давления с новыми плунжерными парами в последовательности через один цилиндр, т. е. к нечетным цилиндрам установили насосы с новыми плунжерными парами, а у четных цилиндров оставили изношенные плунжерные пары для проверки пуска двигателя и рабочих температур. На рис. 7 приведена соответствующая диаграмма температур выпускных газов в цилиндрах двигателя.

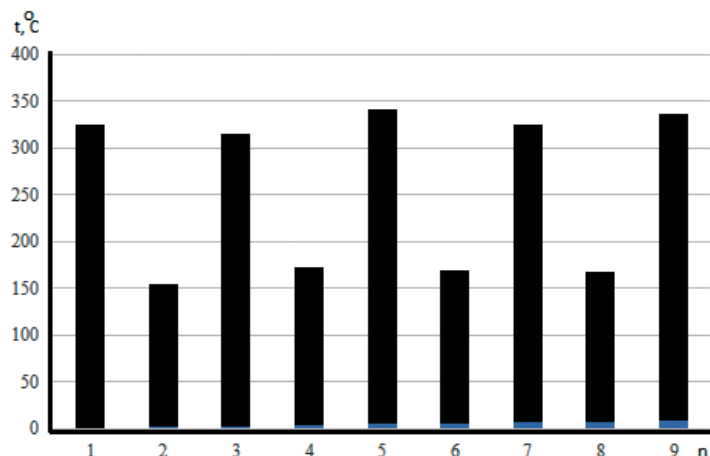


Рис. 7. Распределение температуры выпускных газов по цилиндрам:
 n — порядковый номер цилиндра двигателя;
 t — температура выпускных газов двигателя, °C

Основной причиной отсутствия запуска двигателя является нехватка топлива для его разгона и набора номинальной частоты вращения, так как в плунжерной паре наблюдалось падение давления рабочей смеси при такте нагнетания топлива с уменьшением КПД насоса. [9]. Из рис. 7 видно, что цилиндры с изношенными плунжерными парами в ТНВД значительно отстают по рабочим температурам. С целью предотвращения неравномерного износа подшипников скольжения коленчатого вала дизель-генератор не включался в параллельную работу и не принимал нагрузку от потребителей [9]. Также при проверке цилиндров по давлению сжатия и сгорания отмечалось снижение давления сгорания p_z с нормального, равного 16,2 Па, до $11,3 \cdot 10^6$ Па. При старте двигателя вынужденной мерой являлось физическое воздействие на рейки изношенных насосов путем полного нажатия на них до максимальной отметки, так как положение рейки регулятора частоты вращения не позволяло запустить двигатель с уменьшенной подачей топлива в цилиндры.

Заключение (Summary)

Основным назначением систем топливообработки и фильтрации является сохранение ресурса элементов топливной аппаратуры путем подготовки топлива до требуемых эксплуатационных параметров до того, как оно будет впрыснуто в цилиндр двигателя. Наиболее опасным свойством некачественного топлива является наличие в нем механических примесей, которые очень близки по плотности с нефтепродуктом, что осложняет дальнейшую очистку и сепарацию [10]. Несмотря на наличие большого выбора судовых установок по очистке топлива, нефтепродукты всегда содержат мельчайшие частицы в виде примесей, которые наносят необратимые разрушения и износ топливной аппаратуре.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костецкий Б. И. Износ плунжерных пар насосов / Б. И. Костецкий [и др.] // Механизация и электрификация социалистического хозяйства. — 1973. — № 12. — С. 21–48.
2. Уханов А. П. Теоретическая оценка влияния дизельного смесового топлива на износ плунжерных пар ТНВД / А. П. Уханов, Д. А. Уханов, Е. Г. Ротанов, Г. А. Окунев // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. — 2011. — № 2 (14). — С. 115–119.
3. Пипченко А. Н. Эксплуатация, обслуживание и ремонт двигателей MAN B&W-ME / А. Н. Пипченко. — Одесса: Тренажерный центр, 2014. — 305 с.
4. Орешенков А. В. Трибологические характеристики горюче-смазочных материалов / А. В. Орешенков, Н. Н. Гришин, С. Е. Степанова // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. — 2017. — № 2. — С. 23–25.

5. Инструкция по эксплуатации: «Hyundai Himsen H21/32». — Корея, 2014. — 387 с.
6. Возницкий И. В. Аварии судовых двигателей внутреннего сгорания / И. В. Возницкий, Л. А. Иванов. — М.: Морской транспорт, 2015. — 242 с.
7. Калугин В. Н. Характеристики и свойства морских сортов топлива, особенности топливо-использования: учеб. пособие / В. Н. Калугин. — Одесса: ОГМА, 2000. — 51 с.
8. Пахомов Ю. А. Топливо и топливные системы судовых дизелей / Ю. А. Пахомов, Ю. П. Коробков [и др.]. — М.: Консульт, 2004. — 496 с.
9. Ивановская А. В. Контроль смазочных масел в судовых условиях. Проблемы и способы их совершенствования / А. В. Ивановская, С. Г. Неженец, Д. Е. Белов // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. — 2018. — № 3. — С. 49–57.
10. Белоусов Е. В. Топливные системы современных судовых дизелей: учеб. пособие / Е. В. Белоусов. — 3-е изд., стер. — СПб.: Издательство «Лань», 2017. — 256 с.
11. Reddy M. S. Effect of straight vegetable oil blends and biodiesel blends on wear of mechanical fuel injection equipment of a constant speed diesel engine / M. S. Reddy, N. Sharma, A. K. Agarwal // Renewable Energy. — 2016. — Vol. 99. — Pp. 1008–1018. DOI: 10.1016/j.renene.2016.07.072.
12. Belagur V. Influence of fuel injection rate on the performance, emission and combustion characteristics of DI diesel engine running on Calophyllum inophyllum Linn oil (Honne Oil)/diesel fuel blend / V. Belagur. — SAE Technical Paper, 2010. — № 2010–01–1961. DOI: <https://doi.org/10.4271/2010-01-1961>.
13. Alahmer A. Influence of using emulsified diesel fuel on the performance and pollutants emitted from diesel engine // Energy Conversion and Management. — 2013. — Vol. 73. — Pp. 361–369. DOI: 10.1016/j.enconman.2013.05.012.
14. Yue P. The fluid–structure–thermal coupled characteristics of the leakage rate of piston couples interface for common-rail injector / P. Yue, J. Zhao, K. Wei, X. Ma // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. — 2019. — Vol. 233. — Is. 16. — Pp. 5826–5835. DOI: 10.1177/0954406219856032.
15. Osipowicz T. The analysis of technical condition common rail fuel system components / T. Osipowicz, K. F. Abramek, Z. Matuszak, M. Jaśkiewicz, K. Ludwinek, M. Poliak // 2018 XI International Science-Technical Conference Automotive Safety. — IEEE, 2018. — Pp. 1–8. DOI: 10.1109/AUTOSAFE.2018.8373304.

REFERENCES

1. Kostetskii, B. I. [et al.]. “Iznos plunzhernykh par nasosov.” *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sotsialisticheskogo khozyaistva* 12 (1973): 21–48.
2. Ukhanov, A. P., D. A. Ukhanov, E. G. Rotanov and G. A. Okunev. “Theoretical assessment of the impact of diesel fuel composition on the wear of plunger injection pump.” *Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy* 2(14) (2011): 115–119.
3. Pipchenko, A. N. *Ekspluatatsiya, obsluzhivanie i remont dvigatelei MAN B&W-ME*. Odessa: Trenazhernyi tsentr, 2014.
4. Oreshenkov, A. V., N. N. Grishin, and S. E. Stepanova. “Tribological characteristics fuels and lubricating materials.” *World of Petroleum Products* 2 (2017): 23–25.
5. *Instruktsiya po ekspluatatsii: «Hyundai Himsen N21/32»*. Koreya, 2014.
6. Voznitskii, I. V., and L. A. Ivanov. *Avarii sudovykh dvigatelei vnutrennego sgoraniya*. M.: Morskoi transport, 2015.
7. Kalugin, V. N. *Kharakteristiki i svoystva morskikh sortov topliva, osobennosti toplivo-ispol'zovaniya: ucheb. posobie*. Odessa: OGMA, 2000.
8. Pakhomov, Yu. A. [et al.]. *Toplivo i toplivnye sistemy sudovykh dizelei*. M.: Konsul't, 2004.
9. Ivanovskaya, A. V., S. G. Nezhenets, and D. E. Belov. “Kontrol' smazochnykh masel v sudovykh usloviyakh. Problemy i sposoby ikh sovershenstvovaniya.” *Vestnik Kerchenskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnologicheskogo universiteta* 3 (2018): 49–57.
10. Belousov, E. V. *Toplivnye sistemy sovremennykh sudovykh dizelei: ucheb. posobie*. 3rd ed. SPb.: Izdatel'stvo «Lan'», 2017.
11. Reddy, M. Sarveshwar, Nikhil Sharma, and Avinash Kumar Agarwal. “Effect of straight vegetable oil blends and biodiesel blends on wear of mechanical fuel injection equipment of a constant speed diesel engine.” *Renewable Energy* 99 (2016): 1008–1018. DOI: 10.1016/j.renene.2016.07.072.

12. Belagur, Venkanna. *Influence of fuel injection rate on the performance, emission and combustion characteristics of DI diesel engine running on Calophyllum inophyllum Linn oil (Honne Oil)/diesel fuel blend*. No. 2010–01–1961. SAE Technical Paper, 2010. DOI: 10.4271/2010-01-1961.
13. Alahmer, Ali. “Influence of using emulsified diesel fuel on the performance and pollutants emitted from diesel engine.” *Energy Conversion and Management* 73 (2013): 361–369. DOI: 10.1016/j.enconman.2013.05.012.
14. Yue, Pengfei, Jianhui Zhao, Kebiao Wei, and Xiuzhen Ma. “The fluid–structure–thermal coupled characteristics of the leakage rate of piston couples interface for common-rail injector.” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 233.16 (2019): 5826–5835. DOI: 10.1177/0954406219856032.
15. Osipowicz, T., K. F. Abramek, Z. Matuszak, M. Jaśkiewicz, K. Ludwinek, and M. Poliak. “The analysis of technical condition common rail fuel system components.” *2018 XI International Science-Technical Conference Automotive Safety*. IEEE, 2018. DOI: 10.1109/AUTOSAFE.2018.8373304.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Белов Дмитрий Евгеньевич — аспирант
Научный руководитель:
Ивановская Александра Витальевна
ФГБОУ ВО «Керченский государственный
морской технологический университет»
298309, Российская Федерация, Керчь,
ул. Орджоникидзе, 82
e-mail: oscarweb.007@gmail.com
Ивановская Александра Витальевна —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Керченский государственный
морской технологический университет»
298309, Российская Федерация, Керчь,
ул. Орджоникидзе, 82
e-mail: invkerch@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Belov, Dmytrii E. — Postgraduate
Supervisor:
Ivanovskaya, Aleksandra V.
Kerch State Maritime
Technological University,
298309, Russia, Kerch,
Ordzhonykydze St., 82
e-mail: oscarweb.007@gmail.com
Ivanovskaya, Aleksandra V. —
PhD, associate professor
Kerch State Maritime
Technological University
82 Ordzhonykydze Str., Kerch, 298309,
Russian Federation
e-mail: invkerch@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 23 апреля 2021 г.
Received: April 23, 2021.