WEB ISSN 2535-003X
PRINT ISSN 2535-0021

ИЗСЛЕДВАНЕ ВЛИЯНИЕТО НА ЗАМЪРСЯВАНЕТО НА ВЪЗДУШНИЯ ОХЛАДИТЕЛ И ИЗНОСВАНЕТО НА БУТАЛНИТЕ ПРЪСТЕНИ НА КОРАБНИТЕ ДВИГАТЕЛИ, ВЪРХУ СПЕЦИФИЧНИЯ РАЗХОД НА ГОРИВО, АЗОТНИТЕ И СЕРНИТЕ ОКСИДИ

EXAMINATION OF THE INFLUENCE OF THE AIR COOLER CONTAMINATION AND THE PISTON RINGS WEAR ON THE MARINE DISESEL ENGINES BSFOC, NOx AND SOx

ас. Христов, Д.Д.
ВВМУ " Н. Й. Вапцаров" – Варна, България

d.hristov@nvna.eu

Abstract: The influence of the air cooler air side contamination and the piston rings wear on the marine diesel engines specific fuel consumption and NOx and Sox emissions is examined. Experimentally-statistical research approach is used. Mathematical models and graph data have been proposed.

Key words: STATISTICAL MODELING; AIR COOLER CONTAMINATION; PISTON RINGS WEAR; MARINE DIESEL ENGINES BSFOC, NOx AND SOx

1. Увод

Промените в климата в следствие на човешката дейност, налагат приемането на ограничаващи международни мерки, с цел да се ограничат емисиите на парникови газове. Корабоплаването се явява основен източник на парникови газове. Международната морска организация въвежда завишени изисквания към емисиите на изходящи газове на корабните двигатели. Икономичността при работа на двигателите е основен показател за ефективността им и има отражение върху техните вредни емисии. Серните и азотните оксиди имат основен принос за киселинните дъждове и увеличаването на хроничните белодробни заболявания при хората. Конвенцията MARPOL и в частност шести анекс, установява задължителни изисквания към енергийната ефективност на корабите и налага ограниченията при емисиите на серни и азотни оксиди [1]. През последните години са поставени нови по-ограничаващи лимити на серните и азотните оксиди в контролираните зони, където интензивността на корабоплаването е изключително висока.

При съвременните корабни дизелови двигатели с принудително пълнене, влошаването на техническото състояние на елементите на самия двигател и замърсяването на въздушния охладител имат отношение към реализирания разход и емисиите [2]. При нормалната техническа експлоатация на двигателя, се наблюдава нормално техническо износване на елементите му, в това число и на буталните пръстени. Въздушния охладител се замърсява най-вече от маслените изпарения, намиращи се в машинното отделение, засмукани от компресора на ТКА и подведени в тракта на двигателя. В зависмост от амортизацията на механизмите в машинното отделение е възможно, това замърсяване да протича много интензивно.

Целта на доклада е да се извърши изследване на влиянието на замърсяването на въздушния охладител и износването на буталните пръстени на двигателя, върху изменението на разхода на гориво на двигателя и неговите емисии.

В изпълнение на целта се поставят следните задачи:

- Да се анализира влиянието на замърсяване на въздушния охладител и износването на буталните пръстени върху специфичния разход на гориво.
- Да се анализира влиянието на замърсяване на въздушния охладител и износването на буталните пръстени върху емисиите азотни оксиди.
- Да се анализира влиянието на замърсяване на въздушния охладител и износването на буталните пръстени върху емисиите серни оксиди.

В доклада се разглеждат и се представят резултати от изследване на влиянието на отклоненията на характеристиките на въздушния охладител и износването на буталните пръстени на корабния ДВГ върху специфичния разход на гориво, NOx и SOx.

2. Технология и метод на изследване

Използва се експериментално-статистически подход. За набирането на необходимата информация е използван симулатор TECHSIM 5000 на фирмата TRANSAS, базиран в лаборатория на ВВМУ „Н.Й. Вапцаров". Данните се отнасят за шест цилиндров бавноходен двутактов дизелов двигател с принудително пълнене MAN 6S50MC-C с ТКА ABB - TPL77-B12 и характеристики: максимална продължителна мощност - 8600 kW , при честота на въртене 127 RPM, с диаметър на цилиндъра 500 мм и ход на буталото 2000 мм, работещ като главен двигател на танкер.

Проведен е планиран експеримент, като са регламентирани два фактора: замърсяването на въздушния охладител (X_1, %) и износването на буталните пръстени, (X_2, %). Избран е оптимален композиционен план B_2 [6], даващ възможност за определяне на математичен модел от типа пълен квадрат

$$y=b_0 +b_1.x_1 +b_2.x_2 +b_{12}.x_1.x_2 +b_{11}.x_1^2 +b_{22}x_2^2 \qquad (1)$$

В табл.1 са представени стойностите на двата фактора в естествен и кодиран вид, връзката между тях и диапазоните на изменението им.

таблица 1

фактори	замърсяването на въздушния охладител			износването на буталните пръстени		
Кодирани [x_i]	+1	0	-1	+1	0	-1
Естествени [X_i] [%]	20	10	0	20	10	0

WEB ISSN 2535-003X
PRINT ISSN 2535-0021

Съгласно плана са проведени по една серия от 9 опита, като резултатите са представени в таблица 2.

таблица 2

			Специфичен разход [%]	NOx [%]	SOx [%]
No	x1	x2	y1	y2	y3
1	-	-	100.0000	100.0000	100.0000
2	+	-	102.7624	98.0444	115.8824
3	-	+	101.1050	101.4257	102.1569
4	+	+	103.8674	98.4986	119.1373
5	-	0	100.5525	100.5551	100.9804
6	+	0	103.3149	98.3220	117.0588
7	0	-	100.5525	97.8804	108.0392
8	0	+	102.2099	98.8771	110.7843
9	0	0	101.1050	98.1201	109.6078

Разширената матрица на плана, за конкретния случай на разглеждане има вида:

$$\mathbf{F}=\begin{vmatrix} +1 & -1 & -1 & +1 & +1 & +1 \\ +1 & +1 & -1 & -1 & +1 & +1 \\ +1 & -1 & +1 & -1 & +1 & +1 \\ +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 \\ +1 & -1 & 0 & 0 & +1 & 0 \\ +1 & +1 & 0 & 0 & +1 & 0 \\ +1 & 0 & -1 & 0 & 0 & +1 \\ +1 & 0 & +1 & 0 & 0 & +1 \\ +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad (2)$$

Ковариационната матрица има вида:

$$\mathbf{C}=\begin{vmatrix} 0.5556 & 0 & 0 & 0 & -0.3333 & -0.3333 \\ 0 & 0.1667 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1667 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.25 & 0 & 0 \\ -0.3333 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0 \\ -0.3333 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 \end{vmatrix} \quad (3)$$

Втори, трети и четвърти ред на матрица **C** съдържат само диагонални елементи. Те се свързват с коефициентите b1, b2 и b12 на модела (1). Това има значение при статистическия анализ на получения от тези данни математичен модел.

От табл.2 се формират вектори на целевите функции, записани в транспониран вид [7] и използвани за пресмятане на коефициенитите **b** на 3 модела по следното матрично векторно уравненеие

$$\mathbf{b} = [\mathbf{F}^T.\mathbf{F}]^{-1}.\ \mathbf{F}^T\ .\ \mathbf{y}, \quad (4)$$

За оценяване на влиянието на факторите (замърсяването на въздушния охладител и износването на буталните пръстени) върху специфичния разход на гориво, азотните оксиди и серните оксиди, са използвани съответно стълбовете четири, пет и шест на таблица 2, като са формирани вектори, представящи изменението на функциите в зависимост от стойностите на факторите.

Представят се предсказани по модела стойности с изрази от типа

$$\mathbf{y}\text{mod}=\mathbf{F}\ *\mathbf{b}. \quad (5)$$

Грешката, отклонението между експерименталната и предсказана стойност се представя с уравнението

$$\mathbf{e}=\mathbf{y}\ -\mathbf{y}\text{mod}\ . \quad (6)$$

Тъй като се провеждат експерименти на симулатор, теоретично следва, че грешката от регистрацията на целевите функции ε=0 и не се провежда проверка на значимост на коефициентите и адекватност. Качествата на модела се оценяват чрез проверка на мярката на определеност (коефициента на множествена корелация), записан в общ вид

$$R=\sqrt{\frac{\sum(ymod\ -\bar{y})^2}{\sum(y-\bar{y})^2}} \quad (7)$$

За сигурност в твърдението, че голямата стойност на R е показател за качеството на модела, следва да се отчетат и степените на свобода $\nu_{ост}$ равен на броя на опитите N минус броя на коефициентите в модела (к+1).

Значимостта на R се проверява по критерия на Фишер,

$$Fi=\frac{R^2(N-k-1)}{(1-R^2)(k)} \quad (8)$$

3. Резултати от изследването

3.1. Влияние на замърсяването на въздушния охладител и износването на буталните пръстени върху специфичния разход на гориво

Използван е четвърти стълб от таблица 2 за формиране на вектора

$$\mathbf{y}1 =[100.0\ \ 102.7624\ \ 101.1050\ \ 103.8674\ \ 100.5525\ \ 103.3149\ \ 100.5525\ \ 102.2099\ \ 101.1050]^T$$

След заместването му в (4) се получава

$$\mathbf{b}1 =[\ 101.2278\ \ \ 1.3812\ \ \ 0.6446\ \ \ \ 0\ \ \ 0.6446\ \ \ 0.0921]^T$$

Предсказаните по модела стойности на специфичния разход на гориво се дават с израза

$$\mathbf{y}1\text{mod} =[99.9386\ \ 102.70\ \ 101.2278\ \ 103.99\ \ 100.49\ \ 103.2535\ \ 100.6753\ \ 101.9644\ 101.2278]^T$$

Грешката, отклонението между експерименталната и предсказана стойност се дава с уравнението

$$\mathbf{e}1=[0.0614\ \ 0.0614\ \ -0.1228\ \ -0.1228\ \ 0.0614\ \ 0.0614\ \ -0.1228\ \ 0.2455\ \ -0.1228]^T$$

Качествена оценка на модела по алгоритъма за оценяване за конкретния случай дава следните резултати:

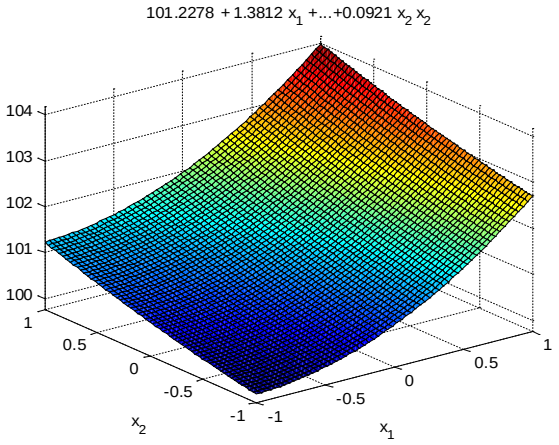
$$R= 0.9954,\ \ \nu_{ост} = 9 -5=4,\ Fi1 =\ 109.$$

По таблици с разпределението на Фишер е определена стойност Fi_t(0,05;4;4)=6.39. Тъй като Fi_t(0,05; 4; 4)= 6.39 < Fi1= 109 R е значим и моделът може да се използва за предсказване.

Полученият модел има вида:

$$y1 =\ 101.2278\ +\ 1.3812*x1 +\ 0.6446*x2 +\ 0.6446*x1*x1 + 0.0921*x2*x2$$

На фигура 1 е даден характера на тази зависимост.



фиг. 1

WEB ISSN 2535-003X
PRINT ISSN 2535-0021

Анализ и изводи:

1) Очакваната максимална стойност на специфичния разход на гориво y1max= 103.9903 се достига при x1=1 x2=1, т.е. при разглежданото максимално замърсяване на охладителя и максимални стойности на износването на буталните пръстени. Минималната стойност y1min= 99.9387 се достига при x1=-1 и x2=-1. Тенденцията на увеличаване специфичния разход, с влошаване на техническото състояние се свързва с влошаване условията на работа на системата за принудително пълнене и увеличаването на утечките в цилиндро-буталната група, при което за поддържане на натоварването на двигателя, управляващата система подава допълнително гориво [2].
2) При изследването на измененията на замърсяването (x1) и износването (x2) могат да се направят следните пресмятания за специфичния разход: y1(x1=-1, x2=1)= 101.2279 ; y1(1,-1) = 102.7011; y(1,1) - y(-1,1)= 103.9903-101.2279=2.7624; y(1,-1)-y(-1,-1)= 102.7011-99.9387= 2.7624.
Следователно, чувствителността на специфичния разход (y1) спрямо нарастването на замърсяването (x1) не зависи от износването x(2).

3.2 Влияние на факторите върху образуването на азотни оксиди (NOx).

Използван е пети стълб от таблица 2 за формиране на вектора

y2 =[100.0 98.0444 101.4257 98.4986 100.5551 98.3220 97.8804 98.8771 98.1201]^T

След заместването му в (4) се получава

b2 =[98.2112 -1.1860 0.4794 -0.2429 1.1818 0.1220]^T

Предсказаните по модела стойности на NOx се представя с израза:

y2mod =[99.9786 98.0924 101.4232 98.5655 100.5790 98.2070 97.8538 98.8126 98.2112]^T

Грешката, отклонението между експерименталната и предсказана стойност се прдставя с уравнението

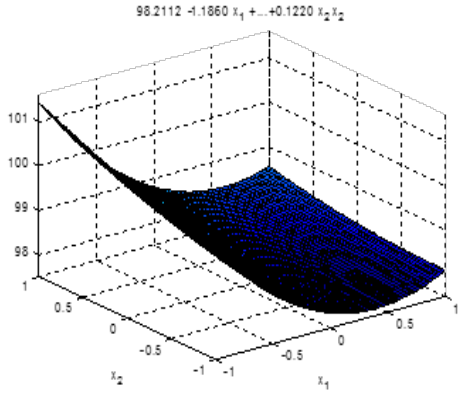
e2=**y2** –**y2**mod

e2=[0.0214 -0.0480 0.0025 -0.0669 -0.0239 0.1150 0.0266 0.0645 -0.0911]^T

Качествата на модела се оценяват чрез проверка на мярката на определеност (коефициента на множествена корелация) R, определена по (7), R2= 0.9987. Независимо, че той има голяма стойност, тя зависи и от степените на свобода $\nu_{ост}$ = 9-6=3. Извършва се проверка на значимост на R по критерия на Фишер по (8). Получена е стойност Fi2 = 225.8354. Определена е таблична стойност за критерия на Фишер Fi_t(0,05;5;3)=9.01. Тъй като Fi_t(0,05;5;3)=9.01 < Fi2 = 225.8354, R2 е значим и моделът може да се използва за предсказване. Окончателно моделът има вида

$$\mathbf{y}2 = 98.2112 -1.1860*x1 + 0.4794*x2 -0.2429*x1*x2 + 1.1818*x1*x1 + 0.1220*x2*x2$$

Зависимостта на NOx от изследваните фактори е представена на фигура 2.



фиг. 2

Анализ и изводи:

1) Максималната стойност на NOx y2max= 101.4233 се достига при x1=-1 x2=1, т.е. при минимално замърсяване на охладителя и максимални стойности на износването на буталните пръстени. Неплътността в горивните камери води до неефективно изгаряне на горивото в цилиндрите, при което газовете с по-високи температури, увеличават работоспособността на ТКА. Чистият въздушен охладител пропуска допълнителното количество въздух към цилиндрите, с което в горивния процес се въвежда и допълнително кислород. Така горенето протича при по-голям излишък на кислород, което обяснява и по-голямото количество сформирани азотни оксиди [3].
2) Минимални стойности на образуваните азотни оксиди се наблюдават при номинално състояние на буталните пръстени и замърсен въздушен охладител. При това турбината на ТКА, получава предвиденото количество газове за съответният режим, а въздушния охладител възпрепятства доставянето на оптималното количество въздух от компресора. Коефициента на излишен въздух намалява, намалява и кислорода в областта на горене, от където и сформираното количество азотни оксиди също намалява [4].
Налице е минимална стойностна NOx, която се достига при минимално износване на буталните пръстени, x2=-1. По модела, при x2=-1 се получава
y2o = 97.8538 -0.9431*x1 + 1.1818*x1*x1
От условието за екстремум на функция
d_y2o/dx1=-0.9431+2*1.1818x1=0 , откъдето следва x1min = 0.4. По модела, при x2=-1 и x1min = 0.4 се получава минималната стойност на NOx= 97.6656 %
3) Тъй като корабните двигатели, включително разглеждания, работят при бедни гориво-въздушни смеси е нормално механизма на формиране на азотни оксиди да бъде обяснен с високо температурното им образуване при излишък на кислород [4]. Режимите на двигателя при влошено техническо състояние, съпроводени с намаляване на работоспособността на ТКА, ограничават и образуването на азотни оксиди.

3.3 Влияние на факторите върху образуването на серни оксиди (SOx).

Използван е шести стълб от таблица 2 за формиране на вектора

y3 =[100.0 115.8824 102.1569 119.1373 100.9804 117.0588 108.0392 110.7843 109.6078]^T

След заместването му в (4) се получава

b3 = [109.3986 8.1569 1.3595 0.2745 -0.2745 0.1177]^T

Предсказаните по модела стойности на серните оксиди се представя с израза

WEB ISSN 2535-003X
PRINT ISSN 2535-0021

y3mod =[100.0 115.7647 102.1700 119.0327 100.9673 117.2810 108.1568 110.8758 109.3986]^T

Грешката, отклонението между експерименталната и предсказана стойност се представя с уравнението

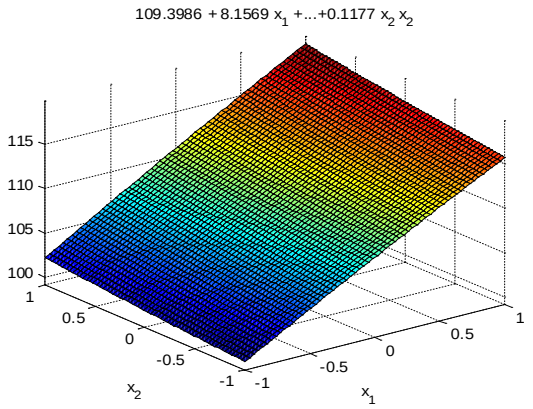
e3=[-0.00 0.1177 -0.0131 0.1046 0.0131 -0.2222 -0.1176 -0.0915 0.2092]^T

Качествата на модела се оценяват чрез проверка на мярката на определеност (коефициента на множествена корелация) R, определена по (7), R3= 0.9998. Независимо, че той има голяма стойност, тя зависи и от степените на свобода $\nu_{ост}$ = 9-6=3. Извършва се проверка на значимост на R по критерия на Фишер по (8). Получена е стойност Fi3 = 1754.5. Определена е таблична стойност за критерия на Фишер Fi_t(0,05;5;3)=9.01. Тъй като Fi_t(0,05;5;3)=9.01 < Fi3 = 1754.5, R3 е значим и моделът може да се използва за предсказване.

Окончателно моделът има вида

y3 = 109.3986 + 8.1569*x1 + 1.3595*x2 + 0.27458x1*x2 - 0.2745*x1*x1 + 0.1177*x2*x2

Зависимостта на SOx от изследваните фактори е представена на следната фигура (3).



фиг. 3

Анализ и изводи:

1) Източник за образуването на серни оксиди в изходящите газове на двигателите се явява единствено съдържаната в горивото сяра. Естествено е очакваните емисии серни оксиди да са свързани с разхода на гориво. Разглежданите резултати съответстват на очакваните, с оглед на увеличения разход на гориво при влошаване на техническото състояние на двигателя [5].
2) В потвърждение на предното се констатира, че максималната стойност на SOx y3max= 119.0328 се достига при x1=1 x2=1, т.е. при максимално замърсяване на охладителя и максимални стойности на износването на буталните пръстени. Минимална стойност на SOx y3min=100.0, се достига при минимално замърсяване на охладителя (x1=-1) и минимално износване на буталните пръстени, x2=-1.
3) По модела, с изменение на замърсяването (x1) и износването (x2) могат да се направят следните пресмятания за SOx: y3(x1=-1, x2=1)= 102.1698; y1(1,-1) = 115.7646; y(1,1) - y(-1,1)= 119.0328 - 102.1698=16.8630; y(1,-1)-y(-1,-1)= 115.7646-100.0= 15.7646.
   Следователно, чувствителността на SOx (y3), спрямо нарастването на замърсяването (x1) е по-голяма при голямо износване на буталните пръстени x(2).

Заключение.

В отговор на целта, в настоящия доклад е извършено изследване на закономерностите на изменение на разхода на гориво на двигателя и неговите емисии, във връзка с изменение на неговото техническо състояние.

- Анализирана е природата на възникване и изменение на разглежданите показатели.
- Използвайки експериментално-статистически подход са създадени работоспособни математични модели на зависимостите на специфичен разход на гориво, азотните оксиди и серните оксиди, в зависимост от степента на замърсяване на охладителя и износването на буталните пръстени на КДВГ.
- По модела, на NOx е определена минимална стойност, независеща от износването на буталните пръстени.

ЛИТЕРАТУРА

1. IMO, Annex VI of MARPOL 73/78 - Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships, 1997
2. Doug Woodyard. Pounder's Marine Diesel Engines and Gas Turbines; Eighth edition 2004
3. United States Environmental Protection Agency. Nitrogen Oxides (NOx), Why and How They Are Controlled November 1999
4. Lloyd's Register of Shipping, Emissions of Nitrogen Oxides (NOx) from Marine Diesel Engines - Questions and Answers; July 2002
5. The International Council on Combustion Engines (CIMAC); Guide to diesel exhaust emissions control of NOx, SOx, particulates, smoke and CO_2; October 2008
6. Вучков, И. С.Стоянов, Математическо моделиране и оптимизация на технологични обекти, Техника, С. 1986
7. Генов, Д. Идентификация на системи, ТУ-Варна, 2004