ВВМУ „НИКОЛА ЙОНКОВ ВАПЦАРОВ“
ФАКУЛТЕТ „ИНЖЕНЕРЕН“

Катедра „Корабни машини и механизми“

Инж. Богдан Димитров Шопов

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО-СТАТИСТИЧЕСКО ИЗСЛЕДВАНЕ И МЕТОДИ ЗА ПОДОБРЯВАНЕ НА ЕКОЛОГИЧНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ С ПОМОЩТА НА АЛТЕРНАТИВНИ ГОРИВА В КОРАБНИТЕ ДИЗЕЛОВИ ДВИГАТЕЛИ

Професионално направление: 5.5. Транспорт, корабоплаване, авиация

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

Н А

Д И С Е Р Т А Ц И О Н Е Н Т Р У Д

за придобиване на образователната и научна степен

„ДОКТОР“

Научни ръководители:
доцент доктор инж. Юлиан Минчев
доцент доктор инж. Цветелина Велкова

Рецензенти и автори на становища:
професор доктор Димитър Йорданов Димитракиев
професор доктор Ивайло Данков Бакалов
професор доктор Димитър Живков Димитров
професор доктор Мирена Миронова Тодорова
доцент доктор Николай Любенов Павлов

Варна, 2023 г.

Дисертантът работи във ВВМУ „Н. Й. Вапцаров“, свободна форма на обучение в катедра „Корабни силови уредби“ при Факултет „Инженерен“ на ВВМУ „Н. Й. Вапцаров“.

Изследванията във връзка с работата по дисертационния труд са осъществени във ВВМУ „Н. Й. Вапцаров“, катедра „Корабни силови уредби“.

Дисертационният труд е насочен за защита от ..... (Факултет „Инженерен“ във ВВМУ „Н. Й. Вапцаров“) в съответствие с чл. 5, ал. 1 от ЗРАС.

Автор: инж. Богдан Димитров Шопов

Заглавие: Експериментално-статистическо изследване и методи за подобряване на екологичните характеристики с помощта на алтернативни горива в корабните дизелови двигатели

Тираж: __ броя

Първа глава

СЪСТОЯНИЕ НА ПРОБЛЕМА. ЦЕЛ И ЗАДАЧИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Актуалност и значимост на дисертационния труд. Пред човечеството днес стоят с голяма острота два въпроса: икономия на енергия и запазване на чистотата на околната среда. За съжаление сред големите замърсители на природата са и мощните дизелови двигатели. Именно затова съвременната наука в областта на развитието на двигателите с вътрешно горене търси варианти за намаляване на зависимостта от изкопаемите горива. Наред с това се засилват и изследванията върху миксирането на стандартното дизелово гориво с друг тип горива с цел синергията им да реши част от екологичните проблеми.

В първа глава на дисертационния труд се описва съвременното състояние на разглеждания научен проблем; представят се характеристиките на използваните в експерименталната част горива, с акцент на спецификите на биоетанола като алтернативно гориво, все още неизследвано достатъчно в България. В научната литература липсват или са оскъдни резултатите от използването на компаундирани горива, както и проучвания за влиянието им върху екологията, което ни дава основание да се насочим към този проблем.

2. Обекти на изследване в дисертационния труд са:

- Корабен дизелов електрогенератор с двигател „Перкинс“, 30 Kwt;
- Корабен дизелов електрогенератор с двигател SKL 3NVD24, за изследване с газоводородна смес.

Изследванията върху двата двигателя са проведени на територията на ВВМУ „Н. Й. Вапцаров“. Те се характеризират със следните параметри (табл. 1, 2):

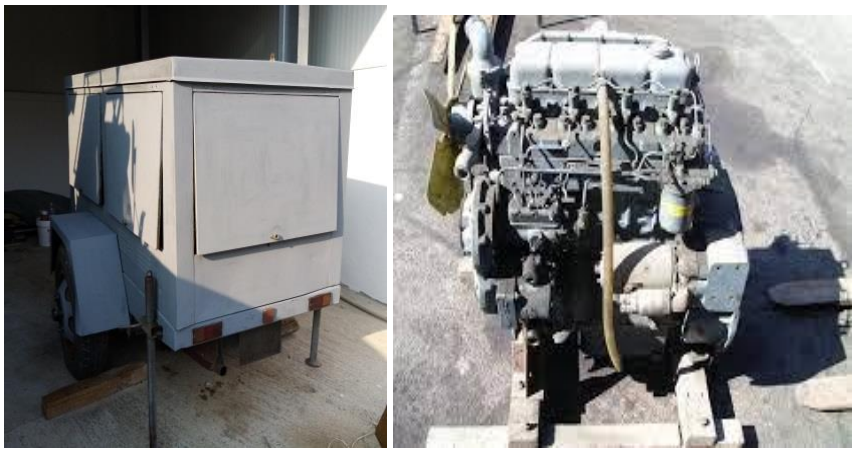
Таблица 1. Данни за двигател SKL 3NVD24

1.	Наименование	3NVD24
2.	Цилиндри	Три
3.	Тип	Четиритактов
4.	Посока на въртене	Дясна
5.	Диаметър на цилиндъра	175 мм
6.	Ход на буталото	240 мм
7.	Номинална мощност при 600 (min^{-1})	44,1 kW (60 bhp)
8.	Работен обем на цилиндъра	5,76 (dm^3)
9.	Максимални обороти	600 (min^{-1})

10.	Минимални обороти	300 (min^{-1})
11.	Средно ефективно налягане	0,52 (MPa)
12.	Степен на сгъстяване	11,85
13.	Средна скорост на буталото	4,8 (m/s)

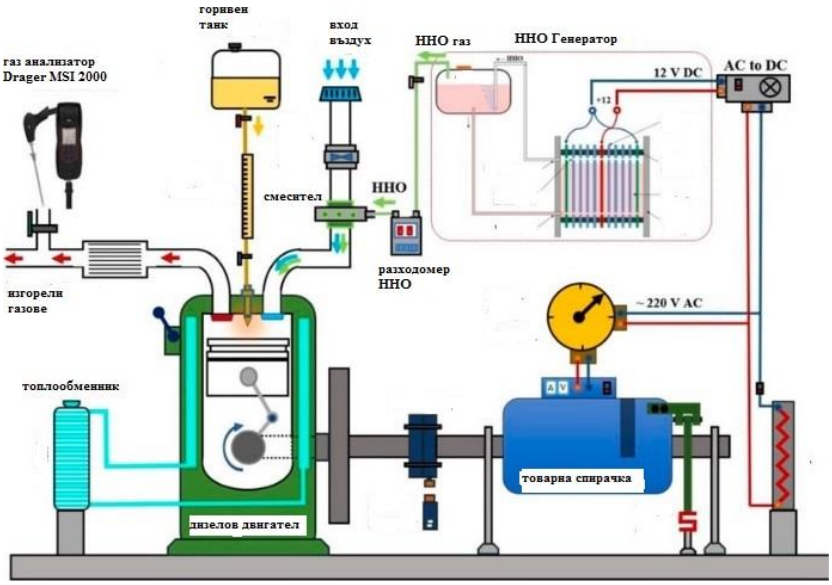
Таблица 2. Данни за двигател „Перкинс“

1.	Тип двигател	Четиритактов
2.	Смесообразуване	С непосредствено впръскване
3.	Диаметър на цилиндъра	98,5 мм
4.	Ход на буталото	127 мм
5.	Работен обем	3,9 $дм^3$
6.	Ред на работа на цилиндрите	1-3-4-2
7.	Номинална мощност – BS649	57,4/78 кВт/к.с.
8.	Обороти при номинална мощност	2500 Об./мин
9.	Максимален въртящ момент	260 Nm
10.	Обороти при максимален въртящ момент	1500 Об./мин
11.	Обем на мазилната система	8,5 $дм^3$
12.	Налягане в мазилната система (при номинални обороти и нормална работна температура)	0,21 - 0,42 Мра
13.	Разход на масло, в % от разхода на гориво	Не повече от 1
14.	Номинален разход на гориво	240 мг/ват/час
		177 г/к.с./час
15.	Температура на охлаждащата течност	83 – 95ºC
16.	Суха маса на двигателя	355 кг



Фигура 1. Дизелов електрогенератор „Перкинс“

3. Предмет на изследване. Предмет на изследване са екологичните характеристики на компаундираните горива чрез извършени тестови изпитания. Използва се експериментален подход чрез специално организирани научни опити за целенасочено получаване на подходяща информация. Данните са математически обработени и представят екологичните показатели на изследваните горива, включително и в зависимост от натоварването на дизеловия двигател.



Фигура 2. Схема на експериментална установка

4. Цел и задачи на дисертацията

Целта на проведеното изследване с двата технически обекта е да се установят температурите на двигателя T_G и съответните нива на CO, NO, (NOx) в отработилите газове. Научният ни интерес е при какво ниво на натоварване на генератора биха се отделили минимални нива на основните вредни емисии в отработилите газове. Експериментът с двигател „Перкинс“ се извършва без натоварване и с натоварване до 4000 W, като се използват основно дизелово гориво и смеси.

Експериментът с двигател SKL 3NVD24 е извършен при номинална честота на въртене и номинално натоварване, при подаване на газо-водородна смес. За постигане на целта се решават следните основни **задачи:**

4.1. Кратка характеристика на съществуващите дизелови и миксирани горива и техните особености.

4.2. Набиране на подходяща информация за статистическо изследване. Избор на подходяща измервателна и регистрираща апаратура.

4.3. Избиране на методология за експериментално статистическо изследване и оценка на влиянието на миксираните дизелови горива върху екологични параметри на дизеловите двигатели.

4.4. Анализ на влиянието на стандартно дизелово гориво върху екологичните показатели на корабен дизелов двигател „Перкинс“. Количествен анализ.

4.5. Изследване на влиянието на компаундирано гориво: 10% биоетанол, 90% дизел, върху екологичните показатели на корабен дизелов двигател „Перкинс“. Количествен анализ.

4.6. Изследване на влиянието на гориво: 30% растително олио, 70% стандартно дизелово, върху екологичните показатели на корабен дизелов двигател „Перкинс“. Количествен анализ.

4.7. Изследване на влиянието на дизел-водородна смес върху екологичните показатели на корабен дизелов двигател SKL 3NVD24. Количествен анализ.

5. Практическа приложимост

Получените математически модели, направените сравнения и анализи са приложими в дейността на научноизследователски лаборатории и в учебния процес.

6. Апробация

По темата на дисертационния труд са публикувани една авторска и две съавторски статии, излезли в международни издания.

7. Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е структуриран, както следва: увод, четири глави, заключение и произтичащи изводи, приноси (съответно научно-приложни и приложни), използвана литература. Съдържанието е изложено в 135 страници, в т. ч. 50 фигури, 30 таблици, а библиографията включва 99 заглавия, от които 47 на кирилица и 52 на латиница.

Схемата на проведеното изследване е дадена на фигура 2.

Втора глава

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЛИЯНИЕТО НА ДИЗЕЛОВИТЕ ГОРИВА И СМЕСИ ВЪРХУ ЕКОЛОГИЧНИТЕ ПОКАЗАТЕЛИ В ЗАВИСИМОСТ ОТ НАТОВАРВАНЕТО НА КОРАБЕН ДИЗЕЛОВ ДВИГАТЕЛ. МАТЕМАТИЧНИ МОДЕЛИ

Учените предлагат различни технически решения за подобряване на горивния процес и на екологичните параметри на корабните двигатели, например чрез обработка на използваното гориво с устройство *AnStoTech,* чрез използване на допълнително монтирано устройство (скрюбер) в димохода на корабния двигател, оптимизиране на смесообразуването в цилиндъра на двигателя, чрез по-пълно изгаряне на горивото в цилиндъра, чрез миксиране на горивни смеси и др. Във втора глава на дисертацията се изследва именно отражението на миксираните горива върху нивата на вредни емисии в отработилите газове. С помощта на математични модели се прави оценка на дизеловите горивни смеси, в сравнение с дизеловото гориво, в зависимост от избран критерий за оптималност.

Методологията на изследването се състои от два етапа: 1) провеждане на експерименти за получаване на данни и разработване на качествени математични модели; 2) оценка на влиянието на видовете горива, като се сравняват реакциите им и се отчита точността на експерименталните данни. Математичният модел е направен в среда на MathLab, като е базиран на теорията на регресионния анализ. Целта му е да установи грешката при отчитането на измерванията. Ако грешката е под 5%, която е приета при такъв тип изследвания, следва да се заключи, че представените данни от измерванията са достоверни и могат да служат за прецизен анализ на екологичността на даден тип гориво.

2.1. Влияние на обикновено дизелово гориво върху екологичните показатели на двигателя в зависимост от натоварването му G_w

Използват се експериментално снети данни, дадени в следната таблица.

Таблица 3. Данни с дизелово гориво

	Фактор	Целева функция	Целева функция	Целева функция	Целева функция
№	x	y_1	y_2	y_3	y_4
	Gw	**T_G**	**CO**	**NO**	**NOx**
	w	^{0}C	Ppm	ppm	ppm
1.	0	149.9	242	403	403
2.	771	160.3	309	481	481

3.	1285	165.5	343	527	527
4.	1750	169.3	352	547	547
5.	2310	173.4	363	570	570
6.	2620	177.3	374	606	606
7.	2820	178.4	356	618	618
8.	3270	184.6	375	668	668
9.	3750	190.2	368	714	714
10.	3999	194.6	364	741	741

Данните за NO и NOx съвпадат, поради което последните не се разглеждат по-нататък в дисертацията.

Важно е да се отбележи, че от точността на данните зависи оценката на качеството на влияние на изследваните горива върху екологичните показатели. Това насочва вниманието на провеждащите експеримента към максимално ограничаване на влиянието от външни шумове.

Вследствие на ограничения от ресурсен характер са проведени 10 броя експерименти, при изменение на натоварването на двигателя и определен тип гориво или горивна смес. Поради факта, че се налага сравнение на експериментални данни и резултати от моделни изследвания, е наложително избраният математически апарат да гарантира високо качество на резултатите от моделирането. Това предполага благоприятна база за добър количествен анализ и оценка на различните типове горива и техните смеси върху физичните и екологичните характеристики на дизеловия двигател. От анализа на работата на двигателя следва, че влиянието на фактора „натоварване“ върху тези характеристики е непрекъсната, гладка функция, което позволява използване на регресионен анализ (РА) с обработка на експерименталните данни по метода на най-малките квадрати (МНМК) и статистически анализ на резултатите, включващ проверка на направените предположения за прилагането му:

- Моделът да бъде линеен по параметри.
- Остатъците да бъдат независими, т.е. cov(ei,ej)=0, за i≠j.
- Нормално разпределение и M(e)=0.
- Нестационарност (хомоскедастичност), σ^2_e = const.
- Коефициентът на корелация между фактора и целевата функция да бъде по-голям от 0,7.

Нарушаването на горните предположения за прилагане на регресионния анализ води до влошаване на качеството на математичните модели.

В изложението се предлагат два типа модели от изследванията: точни, удовлетворяващи цялостната процедура по прилагане на регресионния анализ, и опростени, но адекватни, които са получени само по МНМК. Причината за тяхното разглеждане е в това, че са прости, удовлетворяват изискванията за адекватност; с малка грешка между експерименталните данни и апроксимиращата ги характеристика и са с голям коефициент на корелация между фактора и целевата функция Rxy.

Направените изследвания и произтичащите от тях изводи са дадени в табличен вид, който включва: вид на модела; резултати от проверка на качествата на модела за адекватност; минимална стандартна грешка SY; стойност на коефициента на корелация Ryx, както и проверка на условията за прилагане на РА. За универсалност в записите във всички таблици с x са означени стойностите на фактора „натоварване“ G_w, а с y целевите функции: температура на двигателя T_G (ºC), въглероден окис CO (ppm), азотен окис NO (ppm) и азотни съединения NOx (ppm).

От множеството модели, получени при изследване с определен тип гориво или смес, най-добър е този, който е адекватен, с минимална стандартна грешка SY, максимален коефициент Ryx на Пирсън и с удовлетворяване на условията за прилагане на РА.

2.1.1. Изследване на влиянието на обикновеното дизелово гориво върху температурата T_G (ºC) при различни натоварвания на двигателя G_w (w)

За математическо описание на зависимостта между G_w и температурата T_G (ºC), при стандартно дизелово гориво, се използва математичен модел:

$$T_G = 151.449192624143+0.009305131072* Gw + 0.000000286138*Gw*Gw.$$

От експерименталните данни се установява, че с нарастването на натоварването на двигателя нараства и температурата на отработилите газове – T_G (ºC).

2.1.2. Изследване на влиянието на обикновеното дизелово гориво върху съдържанието на въглероден окис CO (ppm) при различни натоварвания на двигателя G_w (w)

Приема се, че връзката между натоварването G_w (w) и отделения въглероден окис CO (ppm) е регресионен модел от втори ред:

$$CO_G = 248.630364023913 + 0.082622025881*Gw - 0.000013676436*Gw*Gw$$

Максимално отделеният CO (ppm) е при натоварване $G_{w\ max}$= 3021 w, съответстващо на CO_{max} = 373,42 (ppm).

При седмия опит, с натоварване от 2820W, имаме понижаване на CO до 356 (ppm), като нивата до максималното натоварване се колебаят в тесни граници и не надвишават 375 (ppm).

2.1.3. Изследване на влиянието на обикновеното дизелово гориво върху съдържанието на азотен окис NO (ppm) при различни натоварвания на двигателя G_w (w)

Регресионният модел, даващ връзката между натоварването G_w (w) и отделения азотен окис NO (ppm), е от втори ред: NO_G = 416.883583545414 + 0.065467281574*Gw + 0.000003447298*Gw*Gw

Характерното за азотния окис NO при използване на дизелово гориво е, че с нарастване на натоварването расте стойността му – от 403 (ppm) при минимално натоварване до 741 (ppm) при максималното натоварване.

2.2. Влияние на горивна смес в съотношение: *10% биоетанол, 90% дизелово гориво,* върху екологичните показатели на двигателя в зависимост от натоварването му G_w

Използват се резултати от направения научен експеримент, представени в табличен вид.

Таблица 4. Експериментални данни с горивна смес в състав: 10% биоетанол, 90% дизелово гориво

	Фактор	Целева функция	Целева функция	Целева функция	Целева функция
№	X	y_1	y_2	y_3	y_4
	Gw	**T_G**	**CO**	**NO**	**NOx**
	w	^{0}C	ppm	ppm	ppm
1.	0	148.3	424	298	298
2.	761	152.7	430	323	323
3.	1262	157.1	433	343	343
4.	1715	161.7	428	365	365
5.	2295	167.5	430	398	398
6.	2580	171.8	426	419	419
7.	2820	174.8	417	439	439
8.	3231	179.3	407	468	468
9.	3695	184.6	402	510	510
10.	3950	186.4	393	537	537

2.2.1. Изследване на влиянието на горивна смес в съотношение: *10% биоетанол, 90% дизелово гориво,* върху температурата на двигателя T_G (^oC) при различни натоварвания G_w (w)

За математическо описание на зависимостта между Gw (w) и температурата TG (^oC), при използване на горивна смес в състав: 10% биоетанол, 90% дизелово гориво, се прилага математичен модел от параболичен вид: TG_1090= 147.471876468029+0.007272411361. Gw + 0.730339e-6. Gw* Gw

При използването на горивна смес в комбинация: 10% биоетанол, 90% дизелово гориво, температурата на изгорелите газове T_G (°C) нараства заедно с натоварването, като отчетената максимална стойност е 186,4 (°C).

2.2.2. Изследване на влиянието на горивна смес в съотношение: 10% биоетанол, 90% дизелово гориво, върху съдържанието на въглероден окис CO (ppm) при различни натоварвания на двигателя G_w (w)

Приема се, че регресионният модел, даващ връзката между натоварването G_w (w) и отделения въглероден окис CO (ppm) е от втори ред: CO_{G_1090}=423.580779584774+0.01365915692*Gw-0.000005419138*Gw* Gw

Определена е максимална стойност CO_{max} = 432,188 (ppm) при натоварване $G_{w\ max}$= 1260,3 w. С нарастване на натоварването на двигателя стойностите на въглеродния окис намаляват, като минималната стойност е 402 (ppm) при натоварване от 3695W.

2.2.3. Изследване на влиянието на горивна смес в съотношение: *10% биоетанол, 90% дизелово гориво,* върху съдържанието на азотен окис NO (ppm) при различни натоварвания на двигателя G_w (w)

Приема се, че регресионният модел, даващ връзката между натоварването G_w (w) и отделения азотен окис NO (ppm), е от втори ред: NO_{G_1090} = 299.260717636229 + 0.021757183016*Gw + 0.9616207e-5*Gw*Gw

При използване на биоетанола в комбинация с дизеловото гориво NO нараства, като достига максимална стойност от 537 (ppm) при 3950W натоварване.

2.3. Изследване на влиянието на горивна смес в съотношение: *30% олио, 70% дизелово гориво,* върху екологичните показатели на двигателя в зависимост от натоварването му G_w

Използват се експерименталнно снети данни, дадени в следната таблица.

Таблица 5.

	Фактор	Целева функция	Целева функция	Целева функция	Целева функция
№	x	y_1	y_2	y_3	y_4
	Gw	**T_G**	**CO**	**NO**	**NOx**
	w	^{0}C	Ppm	Ppm	ppm
1.	0	163.9	418	407	407
2.	775	169.3	427	447	447
3.	1289	174.4	437	480	480
4.	1744	179.4	427	507	507
5.	2302	184.6	433	542	542
6.	2605	189.0	427	575	575
7.	2798	191.0	418	610	610
8.	3240	194.7	418	641	641

9.	3725	199.4	411	679	679
10.	3985	203.1	408	705	705

2.3.1. Изследване на влиянието на горивна смес в съотношение: *30% олио, 70% дизелово гориво,* върху температурата на двигателя T_G (°C) при различни натоварвания G_w (w)

За математическо описание на зависимостта между натоварването на двигателя G_w (w) и температурата T_G (°C) при използване на горивна смес в състав: 30% олио, 70% дизелово гориво, се приема регресионен математичен модел от параболичен вид:

$$T_{G_3070} = 163.21682816355+0.008696588848.\ G_w + 0.325032e\text{-}6.\ G_w * G_w$$

Тук може да се обобщи, че с нарастване на натоварването съответно нараства и температурата на отработилите газове, като достига максимална стойност от 203 (°C) при натоварване от 3985W.

2.3.2. Изследване на влиянието на горивна смес в съотношение: *30% олио, 70% дизелово гориво,* върху съдържанието на въглероден окис CO (ppm) при различни натоварвания на двигателя G_w (w)

Приема се, че регресионният модел, даващ връзката между натоварването G_w (w) и отделения въглероден окис CO (ppm), е от втори ред:

CO_{G_3070} = 419.452631841882 + 0.014263675805*Gw-0.000004443655*Gw * Gw.

Определена е максимална стойност CO_{max} = 430.8989 (ppm) при натоварване $G_{w\ max}$= 1604.9 w. Нивата на CO плавно намаляват с нарастване на натоварването. Най-ниска стойност е при натоварване от 3985W, нарастването на въглеродния окис спира растежа си при натоварване от 1744W.

2.3.3. Изследване на влиянието на горивна смес в съотношение: *30% олио, 70% дизелово гориво,* върху съдържанието на азотен окис NO (ppm) при различни натоварвания на двигателя G_w (w)

Приема се, че регресионният модел, даващ връзката между натоварването G_w (w) и отделения азотен окис NO (ppm), е от втори ред:

NO_{G_3070} = 405.722376813369 + 0.047586982267*Gw + 0.7130312e-5*Gw*Gw.

При използването на горивна смес от 30% олио и 70% дизелово гориво, азотният окис нараства постепенно, като достига максимума си от 705 (ppm) при 3985W натоварване.

2.4. Количествен анализ на влияние на компаундирани горива (*смес: 10% биоетанол, 90% дизелово гориво; горивна смес: 30% олио и 70% дизелово гориво*)

върху екологичните показатели, в сравнение с традиционното дизелово гориво, при различни натоварвания на двигателя G_w (w)

Количественият анализ е извършен чрез съпоставяне по двойки на математичните модели на видовете горива.

2.4.1. Изследване на влиянието на компаундирано гориво: *10% биоетанол, 90% дизелово гориво,* в сравнение с традиционното дизелово гориво, върху температурата на двигателя T_G (°C) при различни натоварвания G_w (w)

По уравненията на T_G и T_{G_1090}, при изменение на натоварването в диапазона G_w=[0 500 1000 1500 2000 2500 3000 3500 4000], са получени стойностите за T_G и T_{G_1090}.

Относителната грешка между двата процеса (в проценти) е:

TG_e%=[2.6262 3.1264 3.4562 3.6296 3.6599 3.5597 3.3405 3.0132 2.5879].

При грешка на експерименталните данни 5%, се приема, че разликата между стойностите на температурите TG_e% на корабния дизелов двигател, при използване на дизелово гориво TG и при гориво 10% биоетанол, 90% дизелово гориво TG_1090, при различни натоварвания G_w (w), е значително под тази стойност. Следователно използването на това гориво не влияе значимо върху температурата на двигателя, в сравнение със стандартното дизелово гориво.

Когато се направи сравнение между стойностите на температурата на изгорелите газове при използването на чисто дизелово гориво и горивна смес: 10% биоетанол и 90% дизелово гориво, прави впечатление, че стойностите са близки при ниските натоварвания, но при максималното натоварване получаваме по-ниски температури при използването на смесеното гориво – 186 (°C), докато при дизеловото гориво стойностите са около 194 (°C).

2.4.2. Изследване на влиянието на компаундирано гориво: *10% биоетанол, 90% дизелово гориво,* в сравнение с традиционното дизелово гориво, върху отделения въглероден окис CO (ppm) при различни натоварвания G_w (w)

По уравнения CO и CO_{G_1090}, при изменение на натоварването в изследвания диапазон са получени стойности за относителната грешка:

CO_e% =[-70.3657 -49.7460 -35.9740 -26.3567 -19.5044 -14.6471 -11.3488 -9.3802 -8.6639].

Максималната относителна грешка, т.е. максимално отрицателно влияние, по абсолютна стойност е 70,3657% при празен ход на двигателя и намалява с увеличаване на натоварването. Използването на гориво: 10% биоетанол, 90% дизелово гориво, влияе значимо влошаващо върху отделения CO на двигателя, в сравнение със стандартното

дизелово гориво. CO има по-ниски стойности при използване на дизеловото гориво, отколкото в смес: 10% биоетанол и 90% дизелово гориво. Минималните стойности тук са: 264 (ppm) при дизеловото гориво и 393 (ppm) при горивната смес.

2.4.3. Изследване на влиянието на компаундирано гориво: *10% биоетанол, 90% дизелово гориво,* в сравнение с традиционното дизелово гориво, върху отделения азотен окис NO (ppm) при различни натоварвания G_w (w)

По уравнения NO и NO_{G_1090}, при изменение на натоварването в изследвания диапазон, са получени стойности за относителната грешка:

NO_e% =[28.2148 30.6198 31.9400 **32.3823** 32.1163 **32.3823** 29.9906 30.0227 26.4012].

Максималните относителни грешки – 32,3823%, са при средно натоварване на двигателя. Използването на гориво: 10% биоетанол, 90% дизелово гориво, влияе със значимо намаляване на отделения NO на двигателя, в сравнение със стандартното дизелово гориво. Относно NO може да се направи категоричният извод, че стойностите са по-ниски при използване на горивна смес: 10% биоетанол и 90% дизелово гориво, отколкото при използването на чисто дизелово гориво.

2.4.4. Изследване на влиянието на компаундирано гориво: *30% олио, 70% дизелово гориво,* в сравнение с традиционното дизелово гориво, върху температурата на двигателя T_G (°C) при различни натоварвания G_w (w)

По уравнения T_G и T_{G_3070}, при изменение на натоварването в изследвания диапазон, са получени стойности за относителната грешка:

TG_e%=[-7.7700 -7.3464 -6.9535 -6.5898 -6.2534 -6.5898 -5.6568 -7.4702 -5.1518].

Максималната относителна грешка в абсолютна стойност е 7,7700% при празен ход на двигателя. Използване на гориво: 30% олио, 70% дизелово гориво, влияе значимо повишаващо по отношение на температурата на двигателя, в сравнение със стандартното дизелово гориво. Може да се обобщи, че температурата на отработилите газове при използване на дизелово гориво е по-ниска, в сравнение с температурата на отработилите газове, при използване на горивна смес от 30% олио и 70% дизелово гориво.

2.4.5. Изследване на влиянието на компаундирано гориво: *30% олио, 70% дизелово гориво,* в сравнение с традиционното дизелово гориво, върху отделения при работата на двигателя въглероден окис CO (ppm) при различни натоварвания G_w (w)

По уравнения CO и CO_{G_3070}, при изменение на натоварването в изследвания диапазон, са получени стойности за относителната грешка:

CO_e% =[-68.7053 -48.4958 -35.1716 -26.0564 -19.7781 -15.5883 -13.0801 -12.0640 -12.5212].

Максималната относителна грешка по абсолютна стойност е 68,7053% при празен ход на двигателя и намалява с увеличаване на натоварването. Използване на гориво: 30% биоолио, 70% дизелово гориво, влияе значимо повишаващо за отделения CO на двигателя, в сравнение със стандартното дизелово гориво.

Тук стойностите на CO са по-ниски при използване на дизелово гориво, в сравнение с горивната смес от 30% биоолио, 70% дизелово гориво.

2.4.6. Изследване на влиянието на компаундирано гориво: *30% олио, 70% дизелово гориво,* в сравнение с традиционното дизелово гориво, върху отделения при работата на двигателя азотен окис NO (ppm) при различни натоварвания G_w (w)

По уравнения NO и NO_{G_3070}, при изменение на натоварването в изследвания диапазон, са получени стойности за относителната грешка:

NO_e% =[2.6773 4.2578 **5.2200** **5.6795** **5.7317** **5.4548** 4.9130 4.1592 3.2367].

Максималната относителна грешка е 5,7317% в средния диапазон на натоварване на двигателя. Използването на гориво: 30% олио, 70% дизелово гориво, влияе значимо намаляващо върху отделения NO на двигателя, в сравнение със стандартното дизелово гориво, в средния диапазон на натоварване. И тук се забелязват по-ниски стойности на NO при горивна смес: 30% олио, 70% дизелово гориво, в сравнение с чистото дизелово гориво.

Основни изводи от втора глава

1. По отношение на влиянието на обикновено дизелово гориво върху екологичните показатели на двигателя в зависимост от натоварването му G_w

Математичните модели на влияние на обикновено дизелово гориво върху екологичните показатели: температурата TG (ºC); отделени въглероден окис CO (ppm) и азотен окис NO (ppm) са от втори ред. Температурата на отработилите газове при работа с дизелово гориво е по-ниска, в сравнение с температурата при работа с горивната смес с олио, а при работа с биоетанолова смес нивата са близки, като при максимално натоварване имаме по-висока стойност на температурата при работа с дизелово гориво. В ниските и средните натоварвания може да се обобщи, че тук екологичността е по-добра при работа с дизелово гориво. При високи натоварвания обаче се отчита по-добра екологичност при работа с биоетанолова смес. Нивата на CO са най-ниски при работа с дизелово гориво, в сравнение с останалите горивни смеси, което означава, че по отношение на въглеродния окис дизеловото гориво е най-екологично.

При разглеждането на NO се установява, че най-ниските стойности са при биоетаноловата смес, което означава, че тя е по-екологична, в сравнение с дизеловото гориво и горивната смес с олио.

2. По отношение на влиянието на горивна смес в състав: 10% биоетанол, 90% дизелово гориво, върху екологичните показатели на двигателя в зависимост от натоварването му G_w

При биоетаноловата смес температурата на изгорелите газове е по-ниска, в сравнение с горивната смес с олио, което води до извода, че по този показател биоетаноловата смес е по-екологична, в сравнение със сместа с олио. При измерване на CO при биоетаноловата смес имаме най-висока стойност, т.е. сместа е с най-ниско ниво на екологичност, в сравнение с останалите. При тази горивна смес CO достига най-високата си стойност, съответно с натоварване от 761W и от 2295W, при които се отделя 430 (ppm) CO. Относно азотните окиси, биоетаноловата смес е с най-ниски стойности и е с най-добър екологичен показател по този компонент, в сравнение с дизеловото гориво и сместа с олио.

3. По отношение на влиянието на горивна смес в състав: 30% олио, 70% дизелово гориво, върху екологичните показатели на двигателя в зависимост от натоварването му G

Температурата на отработилите газове при сместа с олио е с най-високи стойности, в сравнение с дизеловото гориво и биоетаноловата смес, от което можем да заключим, че по този показател сместа е с най-ниска екологичност. По отношение на CO сместа с олио е с по-високи стойности, в сравнение с дизеловото гориво. В диапазона на натоварване, представляващ интерес, е определена максималната стойност на отделяното количество CO, CO_{max} = 430,8989 (ppm) при натоварване $G_{w\ max}$ = 1604,9 w. При ниски натоварвания се отчита по-ниска стойност на въглеродния окис, в сравнение с биоетаноловата смес, но при по-високи натоварвания биоетаноловата смес е с по-добър резултат. За NO можем да обобщим, че има близки стойности с отчетените резултати при дизеловото гориво, но в сравнение с биоетаноловата смес те са по-високи.

4. По отношение на влиянието на компаундираните горива върху екологичните показатели, в сравнение с дизеловото гориво

- Влиянието на гориво: 10% биоетанол, 90% дизелово гориво, върху температурата на корабния дизелов двигател TG (^oC), в сравнение със стандартното дизелово гориво, е в диапазона на грешките на експеримента и следва да се приеме за незначимо в целия интервал на натоварване Gw (w). Влиянието върху отделения въглероден окис CO е

значимо влошаващо, в сравнение със стандартното дизелово гориво. То е най-голямо при работа на празен ход и намалява с увеличаване на натоварването. Влиянието върху отделения азотен окис NO е значимо намаляващо в целия диапазон на натоварване на двигателя. Има максимална стойност при работа в режим на средно натоварване на двигателя.

- Влиянието на гориво: 30% олио, 70% дизелово гориво, върху температурата TG (^oC) на корабния дизелов двигател при работа, в сравнение със стандартното дизелово гориво, е над диапазона на грешките на експеримента и следва да се приеме за значимо повишаващо в целия интервал на натоварване Gw (w). Влиянието върху отделения въглероден окис CO (ppm), в сравнение със стандартното дизелово гориво, е над диапазона на грешките на експеримента и следва да се приеме за значимо повишаващо в целия интервал на натоварване G_w (w). Максимално е при празен ход и намалява с нарастване на натоварването. Влиянието на отделения NO (ppm), в сравнение със стандартното дизелово гориво, е над диапазона на грешките на експеримента в средния диапазон на натоварване Gw (w). Влияе, като значимо понижава NO в средния диапазон на натоварване, а незначимо – в началото и в края на диапазона на натоварването.
- Резултатите от експеримента с горивни смеси на корабен дизелов двигател „Перкинс“ могат да бъдат обобщени по следния начин: Нивата на CO са по-ниски при използване на дизелово гориво, отколкото при работа с изследваните миксирани горива. Но при NO азотните окиси са с чувствително по-ниски стойности при работа с олио и още по-ниски – при работа с биоетанол.

Трета глава

КОЛИЧЕСТВЕН АНАЛИЗ И СРАВНЕНИЕ НА ОТНОСИТЕЛНИТЕ ВЛИЯНИЯ НА КОМПАУНДИРАНИТЕ ГОРИВА G_10_90 И G_30_70 ВЪРХУ ЕКОЛОГИЧНИТЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРИ РАЗЛИЧНИ НАТОВАРВАНИЯ НА ДВИГАТЕЛЯ Gw. ВРЪЗКИ МЕЖДУ ЕКОЛОГИЧНИТЕ ПОКАЗАТЕЛИ

В трета глава се разглежда степента на относително влияние на гориво G_{3070} спрямо G_{1090}, при различни натоварвания Gw. Това дава информация доколко единият тип компаундирано гориво е по-ефикасен в подобряване на екологичните показатели спрямо другия и дали наистина такова подобрение съществува реално. За целта се

използват по двойки точните математически модели на връзката между екологичните показатели на компаундираните горива и натоварванията, дадени във втора глава.

3.1. Изследване на влиянието на компаундирано гориво G_30_70, в сравнение с G_10_ 90, върху температурата на двигателя T_G (°C) при различни натоварвания G_w (w)

Използват се моделите за влиянието на G_30_70 и G_10_90 върху температурата на двигателя T_G (°C). По тях, в представляващия изследователски интерес диапазон на натоварване G_w (w), даден по-горе (0 – 4000 w), са определени съответните процеси. Относителната разлика между двата процеса: T_{G_3070} и T_{G_1090} (в проценти), записано като вектор ред, в зависимост от натоварването има вида:

TG_ee% =[-10.6766 -10.8108 -10.7824 -10.6042 -10.2900 -9.8534 -9.3083 -8.6679 -7.9453].

Всички абсолютни стойности надхвърлят грешката на експеримента от 5%. Следователно използването на смес: 30% олио, 70% дизелово гориво, влияе значимо отрицателно върху температурата на двигателя, в сравнение с гориво: 10% биоетанол, 90% дизелово, в целия диапазон на натоварване. Влиянието намалява (по абсолютна стойност) с нарастване на натоварването. Можем да направим обобщението, че температурата на отработилите газове е по-ниска при използване на горивна смес от 10% биоетанол и 90% дизелово гориво, в сравнение със стойностите на температурата при използване на горивна смес: 30% олио и 70% дизелово гориво.

3.2. Изследване на влиянието на компаундирано гориво G_30_70, в сравнение с G_10_90, върху отделения въглероден окис CO на двигателя CO_G (ppm) при различни натоварвания G_w (w)

Използват се моделите за влиянието на G_30_70 и G_10_90 върху въглероден окис CO_G (ppm). Относителната разлика между двата процеса: COG_1090 и COG_3070 (в проценти), записано като вектор ред, в зависимост от натоварването, има вида:

COG_ee%=[0.9746 0.8349 0.5901 0.2377 -0.2290 -0.8210 -1.5548 -2.4536 -3.5497].

Грешката, с която се снемат експерименталните данни, е 5%. Разликата между стойностите на въглеродния окис COG_ee% на корабния дизелов двигател, при използване на смес: 30% олио и 70% дизелово гориво и 10% биоетанол, 90% дизелово гориво COG_1090, при различни натоварвания G_w (w), е значително под тази стойност. Следователно използването на гориво: 30% олио, 70% дизелово гориво, влияе под

грешката от експеримента върху CO на двигателя, в сравнение с 10% биоетанол, 90% дизелово. Приема се като незначително, макар и то да е в двете посоки.

При CO интересното е, че при ниските натоварвания сместа от биоетанол и дизелово гориво има по-високи стойности, в сравнение със сместа на биоолио и дизелово гориво, но при по-високите натоварвания нивата на горивната смес с биоетанол имат по-ниски стойности, в сравнение със сместа с биоолио.

3.3. Изследване на влиянието на компаундирано гориво G_30_70, в сравнение с G_10_90, върху отделения азотен окис NO на двигателя NO_G (ppm) при различни натоварвания G_w (w)

По моделите за NO_{G_3070} и NO_{G_1090}, при изменение на натоварването Gw в диапазона на натоварване, са получени процесите NO_{G_1090} и NO_{G_3070}. Относителната грешка между двата процеса (в проценти) е:

NOG_ee% =[-35.5749 -37.9964 -39.2596 **-39.4908** -38.8673 -37.5825 -35.8204 -33.7410 -31.4740].

Разликата между стойностите на азотния окис на корабния дизелов двигател, при използване на смес: 30% олио, 70% дизелово гориво и 10% биоетанол, 90% дизелово гориво NOG_ee%, при различни натоварвания G_w (w) по асолютна стойност е значително над 5%. Следователно използването на смес: 30% олио, 70% дизелово гориво, влияе значително влошаващо върху NO, в сравнение с 10% биоетанол, 90% дизелово гориво. Максималната стойност 39,4908% е в диапазона на средното натоварване.

Тук заключението е, че стойностите са в полза на сместа с биоетанол. Стойностите се движат в границите от 298 до 537 (ppm), докато при сместа с олио границите са от 407 до 705 (ppm).

3.4. Уравнения на връзките между екологичните показатели при обикновено дизелово гориво G; гориво: *10% биоетанол, 90% дизелово гориво* G_1090; гориво: *30% олио, 70% дизелово гориво* G_3070

Анализът на математични модели, дадени в таблица 6, показва, че съществуват линейни модели, които са адекватни, но не удовлетворяват всички условия за прилагане на регресионния анализ. Те се разглеждат като приблизителни. Това са модели от първи ред, получени по МНМК, но неудовлетворяващи всички условия на РА, поради което е възможна изместеност на оценките на коефициентите. Тяхната проста структура позволява получаване на зависимости между разглежданите целеви функции. Създадените във втора глава нелинейни модели имат коефициенти пред квадратичните членове, с няколко порядъка по-малки от линейните.

В таблица 6 са записани получените линейни модели. Тук допълнителният индекс 1 означава, че се отнася за модел от първи ред. В третата колона на таблицата са дадени стойностите на стандартните грешки SY на моделите от първи ред, а в скобите – на моделите от втори ред. Техните стойности са свързани с точността на предсказване.

Таблица 6.

№	Модел	Адекватност	Стандартна грешка SY	Таблица в дисертацията	Означение в дисертацията
1.	T_{G1}= 150.6801 +0.0105. Gw	да	1.39 (1.39)	2.1	2.1.а
2.	CO_{G1}= 285.3890 + 0.0262.Gw	да	23.83 (8.54)	2.2	2.2.а
3.	NO_{G1}=407.6182 + 0.0797.Gw	да	13.74 (13.38)	2.3	2.3.а
4.	T_{G1_1090}=145.5664 + 0.0102.Gw	да	1.44 (0.9)	2.4	2.4.а
5.	CO_{G1_1090}= 437.7195 - 0.0084.Gw	да	9.055 (2.92)	2.5	2.5.а
6.	NO_{G1_1090} = 274.1717+0.0609.Gw	да	15.4 (1.7)	2.6	2.6.а
7.	T_{G1_3070} = 162.3487+ 0.0100.Gw	да	0.87 (0.74)	2.7	2.7.а
8.	CO_{G1_3070} = 431.3216 -0.0040.Gw	не	8.27 (4.28)	2.8	2.8.а
9.	NO_{G1_3070}= 386.6773 +0.0768.Gw	да	13.79 (7.9)	2.9	2.9.а

Дадените в таблицата линейни математични модели се използват за определяне на връзките между екологичните показатели при трите типа дизелови горива. Резултатите се използват за целите на анализа.

А) Приложение на линейни модели на влияние на: обикновено дизелово гориво G; гориво: 10% биоетанол, 90% дизелово гориво, G_1090; гориво: 30% олио, 70% дизелово гориво, G_3070, върху температурата на двигателя T (ºC), отделения въглероден окис CO (ppm) и отделения азотен окис NO (ppm) в отработилите газове в зависимост от натоварването Gw на корабния дизелов двигател, за определяне на връзките на между екологичните показатели в рамките на един вид гориво.

А1) Определяне на връзките на екологичните показатели: T_{G1}, CO_{G1}, NO_{G1}, при обикновено дизелово гориво:

От модели 1, 2, 3 от таблица 6 се получават се следните зависимости:

$CO_{G1} = 2.4952 * T_{G1} – 90.5937$;

$NO_{G1} = 7.5905 * T_{G1} – 736.1155$.

От модели 2 и 3 от таблицата се получава се следната зависимост:

$NO_{G1} = 3.042* CO_{G1} – 460.5539.$

Така получените математични модели дават връзките на екологичните показатели: T_{G1}, CO_{G1}, NO_{G1}, при обикновено дизелово гориво и могат да се използват за сравнение с другите типове горива.

А2) Определяне на връзките на екологичните показатели: T_{G1_1090}, CO_{G1_1090}, NO_{G1_1090}, при гориво: 10% биоетанол, 90% дизелово гориво, G_1090:

От модели 4, 5, 6 от таблица 6 се получават следните зависимости:

$CO_{G1_1090} = -0.8235* T_{G1_1090} + 557.5977;$

$NO_{G1_1090} = 5.9412* T_{G1_1090} -590.6640.$

От модели 5 и 6 от таблицата се получава следната зависимост:

$NO_{G1_1090} = -7.25* CO_{G1_1090} +3447.6.$

Така получените математични модели дават връзките на екологичните показатели: T_{G1_1090}, CO_{G1_1090}, NO_{G1_1090}, при гориво: 10% биоетанол, 90% дизелово гориво, G_1090.

А3) Определяне на връзките на екологичните показатели: T_{G1_3070}, CO_{G1_3070}, NO_{G1_3070}, при гориво: 30% олио, 70% дизелово гориво, G_3070:

От модели 7, 8, 9 от таблица 6 се получават се следните зависимости:

$CO_{G1_3070} = -0.4* T_{G1_3070} + 496.2611;$

$NO_{G1_3070} = 7.68* T_{G1_3070} – 860.1607.$

Тук следва да се отбележи, че модел 8, даден в таблицата, е неадекватен, което предполага по-големи грешки при използването му.

От модели 8 и 9 от таблицата се извежда следната зависимост:

$NO_{G1_3070} = -19.2* CO_{G1_3070} + 8668.$

Б) Определяне на връзките на екологичните показатели: температура на двигателя Т, въглероден окис CO и азотен окис NO, при работа на двигателя с обикновено дизелово гориво, гориво: 10% биоетанол, 90% дизелово гориво, G_1090, и гориво: 30% олио, 70% дизелово гориво, G_3070, между трите вида горива.

Б1) Определяне на връзките между температурата на двигателя Т при трите типа горива – обикновено дизелово гориво T_{G1}; гориво: 10% биоетанол, 90% дизелово гориво, T_{G1_1090}, и гориво: 30% олио, 70% дизелово гориво, T_{G1_3070}:

За определяне на връзката използваме уравнения 1, 4 и 7 от таблица 6.

$T_{G1_1090} = 0.9714* T_{G1} -0.8036;$

$T_{G1_3070} = 0.9524* T_{G1} + 18.8478.$

От модели 4 и 7 от таблицата се получава следната зависимост:

$T_{G1_3070} = 0.9804 * T_{G1_1090} + 19.6387$.

Б2) Определяне на връзките между отделения въглероден окис CO при работа на корабния дизелов двигател с трите типа горива – обикновено дизелово гориво CO_{G1}; гориво: 10% биоетанол, 90% дизелово гориво, CO_{G1_1090}, и гориво: 30% биоолио, 70% дизелово гориво, CO_{G1_3070}.

Използваме уравнения 2, 5 и 8 от таблица 6. Получават се следните зависимости:

$CO_{G1_1090} = -0.3206 * CO_{G1} + 529.2207$;

$CO_{G1_3070} = -0.1527 * CO_{G1} + 474.8936$.

От модели 5 и 8 от таблицата се получава следната зависимост:

$CO_{G1_3070} = 0.4762 * CO_{G1_1090} + 222.8856$.

Б3) Определяне на връзките между отделения азотен окис NO при работа на корабния дизелов двигател с трите типа горива – обикновено дизелово гориво NO_{G1}; гориво: 10% биоетанол, 90% дизелово гориво, NO_{G1_1090}, и гориво: 30% биоолио, 70% дизелово гориво, NO_{G1_3070}.

За определяне на връзката между трите азотни окиса при работа на двигателя с трите вида горива използваме уравнения 3, 6 и 9 от таблица 6.

От модели 3, 6, 9 от таблицата се получават следните зависимости:

$NO_{G1_1090} = 0.7641 * NO_{G1} - 37.2953$;

$NO_{G1_3070} = 0.9636 * NO_{G1} - 6.1068$.

От модели 6 и 9 от таблицата се получава следната зависимост:

$NO_{G1_3070} = 1.2611 * NO_{G1_1090} – 40.9237$.

В) Проверка на качеството на уравненията на връзките на екологичните показатели.

Резултатите от проверката на качеството на уравненията на връзките на екологичните показатели са в 3 режима: минимално, средно и максимално натоварване, и са дадени в таблици 7 и 8.

В колона 1 са показани линейните модели на връзките на екологичните показатели. В колона 2 са дадени стойностите, използвани за пресмятанията, резултатите от които са дадени в колона 3. В колона 4 са дадени експерименталните данни, а в колона 5 – относителна грешка между тези по уравненията на връзките и експеримента. Означенията в таблиците: А1, А2, А3 в таблица 7 се отнасят за моделите на връзките за даден тип гориво, както са описани по-горе; респективно Б1, Б2, Б3 в таблица 8 се отнасят за модели на връзките за даден тип екологичен показател, но при различните горива, описани също по-горе.

Таблица 7.

	Модел на връзката	Стойности за:	Пресметнати по модела	Получени от експеримента	Относ. грешка, колони [I(4-3)I/4]*100%
	1	2	3	4	5
А1)	CO_{G1}=2.4952*T_{G1} – 90.5937	T_{G1} = 160.3	309.3869	CO_{G1}=309	0.1942
		T_{G1} = 173.4	342.0740	CO_{G1}=363	5.7647
		T_{G1} = 190.2	383.9933	CO_{G1}=368	4.3460
	NO_{G1}=7.5905*T_{G1}–736.1155	T_{G1} = 160.3	480.6416	NO_{G1}=481	0.0745
		T_{G1} = 173.4	580.0772	NO_{G1}=570	1.7679
		T_{G1} = 190.2	707.5976	NO_{G1}=714	0.8967
	NO_{G1}=3.042*CO_{G1}–460.5539	CO_{G1} =309	479.4241	NO_{G1} =481	0.3276
		CO_{G1} = 363	643.6921	NO_{G1} = 570	12.9284
		CO_{G1} = 368	658.9021	NO_{G1} = 714	7.7168
А2)	CO_{G1_1090} = -0.8235* T_{G1_1090} + 557.5977	T_{G1_1090}=152.7	431.8493	CO_{G1_1090} =430	0.4301
		T_{G1_1090}=167.5	419.6615	CO_{G1_1090} =430	2.4043
		T_{G1_1090}=184.6	405.5796	CO_{G1_1090} =402	0.8904
	NO_{G1_1090} = 5.9412* T_{G1_1090} - 590.6640	T_{G1_1090}=152.7	316.5572	NO_{G1_1090}=323	1.9947
		T_{G1_1090}=167.5	404.4870	NO_{G1_1090}=398	1.6299
		T_{G1_1090}=184.6	506.0815	NO_{G1_1090}=510	0.7683
	NO_{G1_1090} = -7.25* CO_{G1_1090} +3447.6	CO_{G1_1090}=430	330.1	NO_{G1_1090}=323	2.1981
		CO_{G1_1090}=430	330.1	NO_{G1_1090}=398	17.0603
		CO_{G1_1090}=402	533.1	NO_{G1_1090}=510	4.5294
А3)	CO_{G1_3070} = -0.4* T_{G1_3070} + 496.2611	T_{G1_3070}=169.3	428.5411	CO_{G1_3070}=427	0.3609
		T_{G1_3070}=184.6	422.4211	CO_{G1_3070}=433	2.4432
		T_{G1_3070}=199.4	416.5011	CO_{G1_3070}=411	1.3385
	NO_{G1_3070} = 7.68* T_{G1_3070} – 860.1607	T_{G1_3070}=169.3	440.0633	NO_{G1_3070}=447	1.5518
		T_{G1_3070}=184.6	557.5673	NO_{G1_3070}=542	2.8722
		T_{G1_3070}=199.4	671.2313	NO_{G1_3070}=679	1.1441
	NO_{G1_3070} = -19.2* CO_{G1_3070} + 8668	CO_{G1_3070}=427	469.60	NO_{G1_3070}=447	5.0559
		CO_{G1_3070}=433	354.400	NO_{G1_3070}=542	34.6125
		CO_{G1_3070}=411	776.8	NO_{G1_3070}=679	14.4035

Таблица 8.

	Модел на връзката	Стойности за:	Пресметнати по модела	Получени от експеримента	Относ. грешка, колони [I(4-3)I/4]*100%
	1	2	3	4	5
Б1)	T_{G1_1090} = 0.9714* T_{G1} -0.8036	T_{G1} = 160.3	154.9118	152.7	1.4485
		T_{G1} = 173.4	167.6372	167.5	0.0819
		T_{G1} = 190.2	183.9567	190.2	0.3485
	T_{G1_3070}= 0.9524* T_{G1} + 18.8478	T_{G1} = 160.3	171.5175	169.3	1.3098
		T_{G1} = 173.4	183.9940	184.6	0.3283
		T_{G1} = 190.2	199.9943	199.4	0.2980
	T_{G1_3070} = 0.9804* T_{G1_1090} +19.6387	T_{G1_1090}=152.7	169.3458	169.3	0.0270
		T_{G1_1090}=167.5	183.8557	184.6	0.4032
		T_{G1_1090}=184.6	200.6205	199.4	0.6121
	CO_{G1_1090} = -0.3206* CO_{G1} + 529.2207	CO_{G1} =309	430.1553	430	0.0361
		CO_{G1} = 363	412.8429	430	3.9900
		CO_{G1} = 368	411.2399	402	2.2985

Б2)	CO_{G1_3070} = -0.1527* CO_{G1} + 474.8936	CO_{G1} =309	427.7093	427	0.1661
		CO_{G1} = 363	419.4635	433	3.1262
		CO_{G1} = 368	418.7000	411	1.8735
	CO_{G1_3070} = 0.4762* CO_{G1_1090} + 222.8856	CO_{G1_1090}=430	427.6516	427	0.1526
		CO_{G1_1090}=430	427.6516	433	1.2352
		CO_{G1_1090}=402	414.3180	411	0.8073
Б3)	NO_{G1_1090} = 0.7641* NO_{G1} - 37.2953	NO_{G1}=481	330.2368	323	2.2405
		NO_{G1}=570	398.2417	398	0.0607
		NO_{G1}=714	508.2721	510	0.3388
	NO_{G1_3070} = 0.9636* NO_{G1} - 6.1068	NO_{G1}=481	457.3848	447	2.3232
		NO_{G1}=570	543.1452	542	0.2113
		NO_{G1}=714	681.9036	679	0.4276
	NO_{G1_3070} = 1.2611* NO_{G1_1090} – 40.9237	NO_{G1_1090}=323	366.4116	447	**18.0287**
		NO_{G1_1090}=398	460.9941	542	**14.9457**
		NO_{G1_1090}=510	602.2373	679	**11.3053**

Големите грешки при някои от уравненията на връзките (дадени в болд) се дължат на големите стойности на стандартните грешки SY в моделите на CO_{G1} (Gw), CO_{G1_1090} (Gw) и най-вече в неадекватността на линейния модел CO_{G1_3070} (Gw). Вижда се в моделите, че те влизат като аргументи в уравненията на връзките и водят до по-големите грешки. Например стандартната грешка SY при линейния модел NO_{G1_1090} = 15,4032 е приблизително 10 пъти по-голяма от тази на съответния нелинеен модел SY = 1,6961, а той влиза като аргумент при пресмятане в уравненията на връзките с NO_{G1_3070}.

3.5. Квазиоптимален избор на натоварването в зависимост от екологичните показатели. Пример на приложение

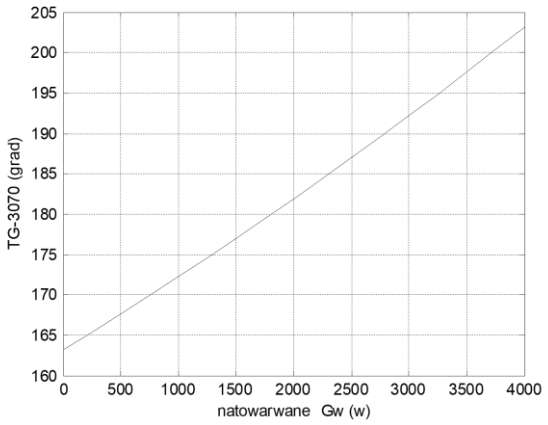
На базата на създадените качествени математични модели на връзката на екологичните показатели и натоварването на корабния дизелов двигател са създадени номограми, позволяващи, при избрано натоварване G_w (w) и вид гориво, да се определят стойностите на:

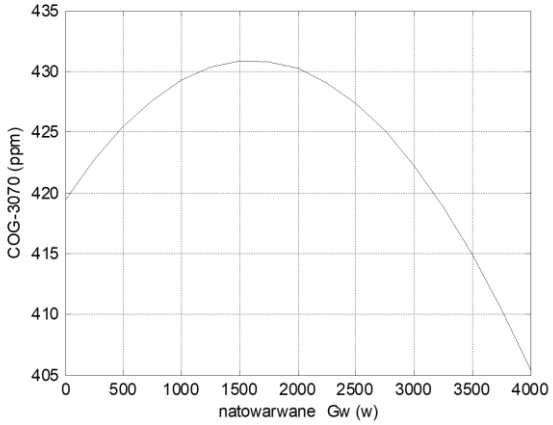
- Температурите на двигателя T_G (°C), T_{G_1090} (°C), T_{G_3070} (°C);
- Въглеродните окиси на отработилите газове: CO (ppm), CO_{G_1090} (ppm), CO_{G_3070} (ppm);
- Азотните окиси на отработилите газове: NO (ppm), NO_{G_1090} (ppm), NO_{G_3070} (ppm).

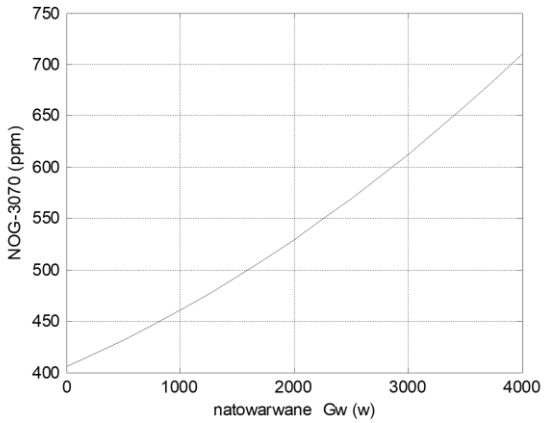
Възможно е решение и на обратната задача: при избрани компромисно екологични показатели, да се определи оптимално гарантиращото ги натоварване.

Пример на приложение: При използване на гориво G_3070, да се определи максимално допустимото натоварване Gw, гарантиращо T_{G_3070} < 185 (°C), CO_{G_1090} < 435 (ppm), NO_{G_1090} < 550 (ppm). По номограмите се избира натоварване Gw=2000 w. Точните стойности на екологичните показатели, при Gw=2000 w, са: T_{G_3070} = 181,9 (°C); CO_{G_3070}

= 430,21 (ppm); NO_{G_1090} = 529,42 (ppm). Точността зависи от прецизното отчитане по номограмите:







3.6. Изводи от трета глава

- Влиянието на гориво: 30% олио, 70% дизелово гориво, върху температурата на корабния дизелов двигател при работа, в сравнение с гориво: 10% биоетанол, 90% дизелово гориво, надхвърля диапазона на грешките на експеримента и е значимо отрицателно в целия диапазон на натоварване G_w (w). Върху отделяния въглероден окис то се приема за незначимо в целия диапазон на натоварване G_w (w), а върху отделяния азотен окис се приема за значимо влошаващо в целия диапазон на натоварване G_w (w).
- Определени са връзките между температурата T; въглероден окис CO и азотен окис NO при работа на двигателя с гориво: 10% биоетанол, 90% дизелово гориво (G_1090), и гориво: 30% олио, 70% дизелово гориво (G_3070), върху екологичните показатели за всяка горивна смес.
- Определени са връзките на еднаквите екологични показатели: температура на двигателя T; въглероден окис CO и азотен окис NO, между *компаундираните горива*.

Качеството на уравненията на връзките на екологичните показатели са проверени

при три режима на натоварване на корабния дизелов двигател: минимално, средно и голямо.

- Предложени са номограми и алгоритъм на приложение, подкрепен с пример за квазиоптимален избор на натоварването в зависимост от екологичните показатели.
- При горивната смес: 10% биоетанол и 90% дизелово гориво, се наблюдават по-ниска температура на отработилите газове, по-ниски нива на NO и по-ниски нива на CO, с изключение на резултатите при ниските натоварвания на двигателя, в сравнение с горивната смес: 30% олио и 70% дизелово гориво.

Четвърта глава

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЛИЯНИЕТО НА ВОДОРОДНА ГАЗ – ДИЗЕЛ ВЪРХУ ЕКОЛОГИЧНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ОТРАБОТИЛИТЕ ГАЗОВЕ НА КОРАБЕН ДИЗЕЛОВ ДВИГАТЕЛ

В четвърта глава се разглежда експериментално изследване на влиянието на водородно-газова смес върху екологичните характеристики на отработилите газове: CO, CO_2, NO (NOx), O_2, qA, Eta и LAMBDA, на корабен дизелов двигател.

В основата на изследванията стоят математически модели, получени с експериментално-статистическия подход, базиран на използването на регресионния анализ. Като основание за това се приема гладкостта на целевите функции (y) при изменение на приетия фактор (x). Прилагането му за получаване на качествени математически модели предполага удовлетворяване на условията, дадени във втора глава.

4.1. Моделиране на зависимостта: ток I (A) – количество водородна газ, GAZ (l/h)

Моделът в реални променливи има вида:

$$H_2 = 1{,}7467 + 0{,}0290.I$$

Същият е адекватен, удовлетворява всички условия на прилагане на метода на най-малките квадрати при създаването му и е с много добра точност.

4.2. Моделиране и изследване на зависимостта: отношение „*водородна газ – дизел* (%)“ върху отделения CO (mg/Nm^3) от корабния дизелов двигател

Моделът в реални променливи има вида:

$$CO = -13.1834 + 5.0810.x - 0.2121.x^2, \text{ където } x = (GAZ/dizel)*100\ \%$$

Моделът е адекватен, удовлетворява всички условия на прилагане на метода на най-малките квадрати при създаването му и е с много добра точност. Максималната стойност: CO_{max} = 17.2463 (mg/Nm^3), се достига при x=11,9778%. До тази стойност нарастването на x=(GAZ/dizel)*100 % води до увеличаване на CO, след което намалява.

4.3. Моделиране и изследване на зависимостта: отношение „*водородна газ – дизел* (%)“ върху отделения CO_2 (V%) от корабния дизелов двигател

Моделът в реални променливи има вида:

$$CO_2 = -2.4201 + 1.0294.x - 0.0546.x^2 \text{ , където } x = (GAZ/dizel)*100\ \%.$$

Съществува максимална стойност на CO_2 в допустимата стойност на изменение на фактора x=9,4267% и $CO2_{max}$ = 2,4318 (V%).

4.4. Моделиране и изследване на зависимостта: отношение „*водородна газ – дизел* (%)“ върху отделения NO (ppm) от корабния дизелов двигател

Моделът в реални променливи има вида:

$$NO = 495.5535 - 59.5411.x + 2.1155.x^2 \text{ , където } x = (GAZ/dizel)*100\ \%.$$

Моделът е адекватен, удовлетворява условията за прилагане на метода на най-малките квадрати при създаването му и е с много добра точност. С нарастване на отношението GAZ/dizel, отделеният NO силно намалява – от 150 (ppm) до 80 (ppm).

4.5. Моделиране и изследване на зависимостта: отношение „*водородна газ – дизел* (%)“ върху отделения O_2 (V%) от корабния дизелов двигател

Моделът в реални променливи има вида:

$$O_2 = 23.7241 - 1.2699.x + 0.0680.x^2 \text{ , където } x = (GAZ/dizel)*100\ \%.$$

Съществува минимална стойност на O_2 в допустимата стойност на изменение на фактора, така че: x=9,3375% и $O2_{min}$ = 17,7953 (V%).

4.6. Моделиране и изследване на зависимостта: отношение „*водородна газ – дизел* (%)“ върху загубата на димни газове qA (%) при работа на корабния дизелов двигател

Моделът в реални променливи има вида:

$$qA = 164.0668 - 25.5360.x + 1.3324.x^2 \text{ , } \text{ където: } x = (GAZ/dizel)*100\ \%.$$

Съществува минимална стойност на qA в допустимата стойност на изменение на фактора x= 9,3375%, qA_{min} = 41,7148 (%).

4.7. Моделиране и изследване на зависимостта: отношение „*водородна газ – дизел* (%)“ върху ефективността Eta (%) при работа на корабния дизелов двигател

Моделът в реални променливи има вида:

Eta= -64.0668+25.5360.x - 1.3324.x^2 , където: x = (GAZ/dizel)*100 %.

Съществува максимална стойност на Eta в допустимата стойност на изменение на фактора x=9,5827% и Eta_{max} = 58,2852 (%).

4.8. Моделиране и изследване на зависимостта: отношение „*водородна газ – дизел* (%)“ върху качеството на работната смес LAMBDA при работа на корабния дизелов двигател

Моделът в реални променливи има вида:

LAMBDA = 23.7985 – 3.6957.x + 0.1975.x^2 , където: x = (GAZ/dizel)*100%.

Съществува минимална стойност на LAMBDA в допустимата стойност на изменение на фактора x=9,3562 и $LAMBDA_{min}$ = 6,5069.

4.9. Изводи от четвърта глава

- Зависимостта между ток I (A) – количество водородна газ GAZ (l/h) е линеен модел. Същият удовлетворява изискванията на PA.
- Математическите зависимости между отношението „водородна газ – дизел (%)“ и: CO (mg/Nm^3), CO_2(V%), NO(ppm), O_2 (V%), qA, Eta, LAMBDA, са параболични регресионни модели. Същите удовлетворяват изискванията на PA за добро качество.
- В допустимата стойност на фактора x= (GAZ/dizel)*100%, съществуват екстремални стойности: x=11,9778%, CO_{max} = 17,2463 (mg/Nm^3); x=9,4267% $CO2_{max}$ = 2,4318 (V%); x=9,3375%; $O2_{min}$ = 17,7953 (V%); x= 9,3375%; qA_{min} = 41,7148 (%); x=9,5827%; Eta_{max} = 58,2852 (%); x=9,3562; $LAMBDA_{min}$ = 6,5069.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представеният дисертационен труд предлага завършено научно изследване на проблемите за влиянието на: стандартно дизелово гориво; смес в състав: 10% биоетанол, 90% дизелово гориво; 30% олио, 70% дизелово гориво, и отношението „водородна газ – дизел (%)“, върху екологичните характеристики на корабни дизелови двигатели. Формулирани са факторите и са избрани екологичните показатели като целеви функции. Използван е математическият статистически подход с прилагане на регресионния анализ. Използваните математични модели дават количествените съотношения на връзката „фактор – екологични показатели“, позволяващи количествена оценка на отношенията на влияние за конкретния дизелов двигател.

Използването на експериментално-статистическия подход, с активен експеримент и регресионен анализ, е ефективен метод за изследване на зависимостите на екологичните показатели от компаундираните горива. На тази основа и с подходяща изследователска технология, на практика се оказа възможно успешното решаване на задачата за цялостно изследване на комплекс от методи за подобряване на екологичните характеристики на корабните дизелови двигатели чрез използване на алтернативни горива. Наред с това – и изборът на тип гориво в зависимост от натоварването на КДД.

ИЗВОДИ

1. Използвайки подходяща технология, основаваща се на експерименталното статистическо моделиране, е решена задачата за определяне на влиянието на: обикновено дизелово гориво; горивна смес: 10% биоетанол, 90% дизелово гориво; горивна смес: 30% растително олио, 70% дизелово гориво, върху екологичните показатели на двигателя в зависимост от натоварването му G_w на температурата TG (^oC), CO (ppm), NO (ppm).
2. Определени са влиянията на компаундираните горива: 10% биоетанол, 90% дизелово гориво и 30% растително олио, 70% дизелово гориво, върху екологичните показатели, в сравнение с дизеловото гориво.
3. Определени са зависимостите между разглежданите по-горе екологични показатели в рамките на един вид гориво.
4. Решена е задачата за определяне на зависимостите между еднаквите екологични показатели при различните горива.

5. Качеството на уравненията на връзките на екологичните показатели са проверени при три режима на натоварване на корабния дизелов двигател: минимално, средно и голямо.

6. Предложени са номограми и алгоритъм на приложение, подкрепен с пример за квазиоптимален избор на натоварването в зависимост от екологичните показатели.

7. Създадени са модели на зависимостите между отношението „водородна газ – дизел (%)“ и: CO (mg/Nm^3), CO_2 (V%), NO (ppm), O_2 (V%), qA, Eta, LAMBDA на КДД.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ НА ДОКТОРАНТА

Научни приноси

1. Създадени са качествени, работоспособни математични модели на влиянието на: обикновено дизелово гориво; смес в състав: *10% биоетанол, 90% дизелово гориво; смес в състав: 30% олио, 70% дизелово гориво*, върху екологичните показатели на двигателя в зависимост от натоварването му. На тяхна база са определени степента и начинът на влияние, както и максималната (минималната) стойност в зависимост от натоварването на КДД.
2. Оценено е количествено влиянието на компаундираните горива: *10% биоетанол, 90% дизелово гориво; 30% олио, 70% дизелово гориво*, в сравнение със стандартното дизелово гориво, върху екологичните показатели на двигателя в зависимост от натоварването му.
3. Създадени са уравнения и са определени връзките между екологичните показатели ($T_{дв}$, CO, NO) при стандартно дизелово гориво; гориво: *10% биоетанол, 90% дизелово гориво*; гориво: *30% олио, 70% дизелово гориво.*
4. Създадени са качествени математични модели на зависимостта „ток – водородна газ на водородната клетка“; влиянието на отношението „водородна газ – дизел (%)“, върху екологичните показатели (CO, CO2, NO, O2, qA, Eta и LAMBDA) на корабен дизелов двигател.
5. Определени са екстремалните стойности на влияние на отношението „водородна газ – дизел“ в областта на изследваните експлоатационни режими.

Приложни приноси

1. Създадени са: план за лабораторни изпитания и информационно осигуряване на експерименталните изследвания.
2. Експериментално са изследвани характеристиките на компаундираните горива: G-10-90, G30-70 и газо-водородна смес.
3. Предложени са номограми и алгоритъм на приложение, подкрепен с пример за квазиоптимален избор на натоварването, в зависимост от допустимите стойности на екологичните показатели.
4. Резултатите от направения експеримент и математическото моделиране могат да послужат като база за по-нататъшни научно-приложни разработки в областта на алтернативните горива.
5. Използваният в научния експеримент двигател „Перкинс D3900“ е приведен в пълна изправност за обучителните нужди на полигон „Карантината“ към ВВМУ – Варна.
6. Двигателят има възможност да работи с експериментираните смеси от горива с цел подобряване на екологичния климат в района на полигона.

Формулиране на насоки за бъдещи разработки

Създадената методика за оценка на екологичните характеристики и качествата на изследваните дизелови корабни горива да се приложат и за други горива.

Списък с научните публикации по темата на дисертацията

1. ШОПОВ, Б., 2021. Квазиоптимален избор на натоварването на корабен дизелов двигател в зависимост от екологичните му характеристики. In: 29st International Scientific Conference *On Transport, Road-Building, Agricultural, Hoisting&Hauling and Military Technics and Technologies*, 21–24.06.2021. *Trans&Motauto – 2021. Proceedings.* Year IV, ussue 1 (8). Sofia, Bulgaria, 2021, pp. 133–135. ISSN 1313-5031 (Print). ISSN 2535-0307 (Online). Available from: http://www.trans-motauto.com/sbornik/2021.pdf [viewed 2023-05-01].

2. HRISTOV, H.; BAKALOV, I.; SHOPOV, B.; YOVKOV, D., 2021. Modeling of the dependence of CO_2 contained in the exhaust gases on the amount of hydrogen gas supplied to the engine. Международна научна конференция – 2021. *Педагогика*. Год. XCIII, кн. 6, 2021 – специално издание: International Maritime Scientific Conference – 2021, с. 217–223. [Online] DOI: https://doi.org/10.53656/ped21-6s.19mod. Available from: https://azbuki.bg/uncategorized/modeling-of-the-dependence-of-co2-contained-in-the-exhaust-gases-on-the-amount-of-hydrogen-gas-supplied-to-the-engine/ [viewed 2023-05-01].

3. HRISTOV, H.; BAKALOV, I.; SHOPOV, B.; YOVKOV, D., 2021. Modelling of the dependence of the produced amount of hydrogen gas (y) on the amperage of cell (x) of a marine diesel engine SKL 3NVD24. Международна научна конференция – 2021. *Педагогика*. Год. XCIII, кн. 6, 2021 – специално издание: International Maritime Scientific Conference – 2021, с. 273–278. [Online] DOI: https://doi.org/10.53656/ped21-6s.24mod. Available from: https://azbuki.bg/uncategorized/modeling-of-the-dependence-of-the-produced-amount-of-hydrogen-gas-y-on-the-amperage-of-cell-x-of-a-marine-diesel-engine-skl-3nvd24/ [viewed 2023-05-01].