

Токсични характеристики на дизелов двигател, работещ с биодизелово гориво и рециркулация на отработили газове

Атанас Илиев, Петър Казаков, Емил Маринов

Summary: Biofuel improves quality of life. When burning his release less harmful emissions: CO, CH, particle, dispersed particles. Furthermore, the NO_x concentration increases. The reasons for this are the higher O₂ content in the high temperature in the combustion chamber during the burning of biodiesel. Emissions of nitrogen oxides (NO_x) can be reduced by appropriate additives, such as cerium oxide, nanoparticles and inhibitors, as well as optimum balance between conventional and bio-fuel mixture through the exhaust gas recirculation (EGR).

Key words: emission system for exhaust gas recirculation (EGR), nitrogen oxides, circuit indicators, economic indicators.

ВЪВЕДЕНИЕ

В последните години става ясно, че не може да се разчита само на петрола като източник на горива за транспорта. Биогоривата се оказват подходяща алтернатива на обикновените горива. Увеличаващите се непрекъснато цени на традиционните горива, тяхната ограниченост в природата и глобалните цели на човечеството за намаляване на количествата на парникови газове и опазване на околната среда, определят биогоривата като горива на бъдещето [1, 2]. Те се получават чрез обработка на възобновяема биомаса. Опитите показват, че могат да заместят изкопаемите горива в транспортния сектор и да се интегрират в глобалната системата за снабдяване с горива. Използването на нови алтернативни горива налага да се изследва работата на дизелови двигатели с различна организация на смесобразуването и горенето, тъй като повечето двигатели са разработени за работа с обикновено дизелово гориво. Добавянето на до 4÷5% естерифицирани мазнини в обикновеното гориво не оказва особено влияние върху основните му качества и върху нормалната работа на двигателя. От друга страна, присъствието на естери оказва неблагоприятно влияние върху елементите, изработени от гума.

При работа на двигателя, в цилиндрите му постъпва въздух и гориво, а чрез изпускателната система се изхвърлят продуктите на горенето - въглероден двуокис (CO₂), въглероден окис (CO), въглеводороди (CH), водни пари, водород (H₂), азот и неговите окиси (NO_x) и др. При изгарянето на биодизеловото гориво количеството на вредните емисии се намалява, съответно за: CO – 10÷30%, CH – 30%, саждите – 40%, дисперсните частици – 40%. Наред с това концентрацията на образувалия се NO_x нараства [5]. Причините за това са по-голямото съдържание на O₂ и по-високата температура в горивната камера при изгаряне на биодизеловото гориво [3]. Количествата на азотни окиси могат да бъдат намалени чрез подходящи добавки и чрез рециркулация на отработилите газове (РОГ).

ИЗЛОЖЕНИЕ

Естерите, използвани в биогоривата, могат да бъдат на различна маслена основа, като рапично и слънчогледово масло, отпадъчни растителни мазнини и др.

На фиг. 1 е показана схема на опитната уредба за изследване работата на дизелов двигател с биодизелово гориво и рециркулация на отработили газове. Устройството за имитиране на процесите на рециркулация представлява тръба с кран, която създава връзка между пълнителната магистрала на двигателя и изпускателния колектор. Газовете преминават през крана 10, с помощта на който може да се променя количеството на отработили газове, пропускани обратно в цилиндрите на ДВГ. Температурата на частта отработили газове може да бъде регулирана посредством топлообменник, поставен на тръбата 9. Определянето на РОГ се изчислява по часовия разход на въздух без и с рециркулация:

$$POГ, \% = \frac{G_B - G_{e,POГ}}{G_B} \cdot 100\% \quad (1)$$

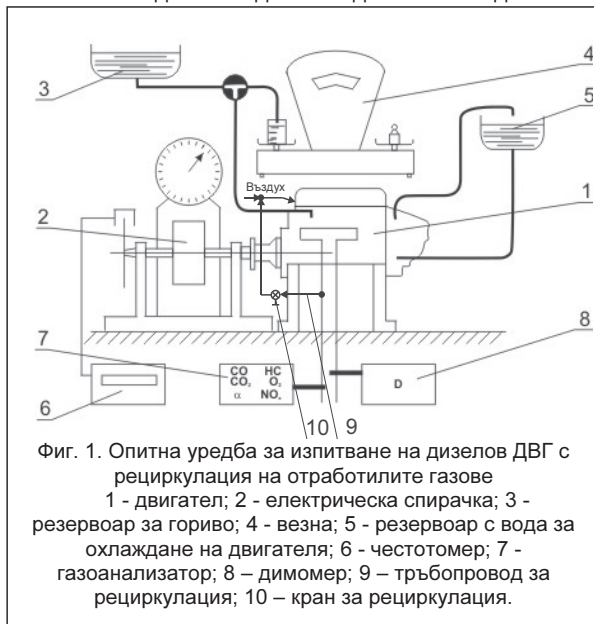
където G_B е разходът на въздух през двигателя без РОГ, kg/h;

$G_{e,POГ}$ - разходът на въздух през двигателя с РОГ, kg/h

Честотата на въртене на колянвия вал на двигателя се измерва с честотомера

6. Посредством 5-компонентен газоанализатор AutoLogic plus са измерени CO , CO_2 , CH , NO_x , O_2 и др.

В последните години в дизеловите двигатели все по-голямо приложение



Фиг. 1. Опитна уредба за изпитване на дизелов ДВГ с рецикулация на отработилите газове
1 - двигател; 2 - електрическа спирачка; 3 - резервоар за гориво; 4 - везна; 5 - резервоар с вода за охлаждане на двигателя; 6 - честотомер; 7 - газоанализатор; 8 – димомер; 9 – тръбопровод за рецикулация; 10 – кран за рецикулация.

намират системите за РОГ. При връщане на част от отработилите газове обратно в горивната камера, се намалява температурата на горивната смес и количеството на свободния кислород, участващ в реакциите на окисление на горивото. С това се намалява количеството на образувалия се NO_x , но за сметка на увеличаване на разхода на гориво и известно увеличаване на количеството на другите токсични компоненти.

Показателите на дизеловите двигатели се определят чрез опити, проведени по една или друга методика. Най-лесният начин е чрез снемане на честотни или товарни характеристики.

Недостатък на тези методи е тяхната ограниченост – резултатите се получават само за конкретно натоварване или честота. При необходимост от определяне на показателите на двигателя в по-широк честотен и товарен диапазон, опитната работа нараства многократно; не винаги е възможно в реално време тя да бъде извършена. При определяне на оптималните стойности на показателите, е необходимо да се получат и съответните уравнения на регресия, описващи хода на дадения експеримент. При отделните, дискретни стойности на нарастване на входните параметри, понякога е невъзможно точно да се определи екстремумът на уравнението на регресия. Това налага да се използват методи, описващи уравнението на отклика в една по-широка и непрекъсваема област, в която да може да се определи минимума или максимума на функцията; освен това е възможно да се определи и комплексното влияние на голям брой входни параметри на показателите на двигателя. Такава възможност предоставят методите за „Планиране на експеримента“.

Чрез методите за планиране на експеримента е възможно със сравнително малък брой опити да се определят регресионните уравнения на отклика и по тях да се определят екстремните стойности на входните величини.

При съставяне на плана на експеримента винаги се върви от план от по-нисък към план от по-висок ред. Условие за преминаване към по-горен ред е адекватността на полученото регресионно уравнение. При *неадекватно* уравнение и анализ, показващ, че факторите и диапазоните им на изменение са избрани

правилно и опитите са поставени и извършени със съответната прецизност, точност и повторение, причина е строго нелинейният характер на отклика. Това е и в основната причина за повишаване на реда на плана на експеримента.

Уравненията от първи ред ($y(x) = a_0 + a_1 \cdot x$) не дават възможност да се определи има ли екстремум – необходимо е уравнението да е непрекъснато и поне два пъти диференцируемо в дадената област. Това, при необходимост от определяне на оптимални стойности, да се премине към план от по-висок ред.

От изходните данни и предварителните „прострелни“ опити е установено, че повечето от изходните показатели на двигателя са нелинейни (получените частни уравнения с достатъчна за изследванията точност, се апроксимират с уравнения от втора степен). Това дава основание да се премине към многофакторно планиране от втори ред.

За определянето на уравнението на отклика от втори ред от вида:

$$y = \sum_{k=0}^n a_k \cdot x_k + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^n a_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{i=1}^n a_{ii} \cdot x_i^2 \quad (2)$$

е използван методът за планиране на експерименти, в частност, ротатабелен експеримент от втори ред с използването на четири независими параметри (табл. 1) и кодираните и действителните им стойности и резултатите от измерването (табл.2).

Таблица 1. Фактори и нива на вариране

Фактори: x_1 - честота на въртене n , min^{-1} ; x_2 - натоварване M_e , kgf.m ; x_3 - Рециркулация, (% $\times 10$); x_4 - съдържание на Биогориво, %								
№	Фактор	Размах Δ	ЗТ - α	Нива на Факторите			ЗТ + α	α
				Долно (-1)	Основно (0)	Горно (+1)		
1	x_1	150	1200	1350	1500	1650	1800	2
2	x_2	1	5	6	7	8	9	2
3	x_3	0,75	0	0,75	1,5	2,25	3	2
4	x_4	4	0	4	8	12	16	2

Таблица 2. Кодирани и действителни стойности на факторите и резултати от измерването

№	Фактори								Измервани величини							
	x_1		x_2		x_3		x_4		CH, ppm	NO _x , ppm	CO ₂ , %	CO, %	O ₂ , %	D, %	α , оп	α
	n, min^{-1}	Me, kgf.m	РОГ, %	Био, %	1	2	3	4								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	-1	1350	-1	6	-1	0,75	-1	4	6	1 223	6,40	0,031	13,3	5,0	30,8	2,13
2	1	1650	-1	6	-1	0,75	-1	4	6	945	7,00	0,036	11,1	11,0	33,0	2,28
3	-1	1350	1	8	-1	0,75	-1	4	6	1 803	6,30	0,040	9,8	16,0	31,3	2,17
4	1	1650	1	8	-1	0,75	-1	4	7	1 300	7,00	0,051	8,8	28,0	27,8	1,92
5	-1	1350	-1	6	1	2,25	-1	4	25	1 448	7,80	0,131	11,0	60,0	28,7	1,99
6	1	1650	-1	6	1	2,25	-1	4	26	1 390	8,10	0,888	8,5	75,0	23,7	1,64
7	-1	1350	1	8	1	2,25	-1	4	33	1 600	7,70	0,071	11,0	35,4	31,6	2,19
8	1	1650	1	8	1	2,25	-1	4	35	1 335	8,00	0,090	8,8	17,4	28,8	1,99
9	-1	1350	-1	6	-1	0,75	1	12	38	1 689	5,50	0,032	11,9	18,0	34,7	2,40
10	1	1650	-1	6	-1	0,75	1	12	34	1 233	6,20	0,035	12,0	35,0	34,1	2,36
11	-1	1350	1	8	-1	0,75	1	12	62	1 934	7,60	0,052	9,7	33,6	27,3	1,89
12	1	1650	1	8	-1	0,75	1	12	44	1 321	8,60	0,041	10,3	21,0	28,4	1,97
13	-1	1350	-1	6	1	2,25	1	12	50	1 605	6,10	0,037	11,2	21,0	32,1	2,22
14	1	1650	-1	6	1	2,25	1	12	65	1 210	6,57	0,033	11,2	27,0	31,3	2,17
15	-1	1350	1	8	1	2,25	1	12	60	1 332	8,50	0,227	8,1	57,8	23,5	1,63
16	1	1650	1	8	1	2,25	1	12	78	845	9,00	0,153	7,5	50,0	22,5	1,56
17	- α	1200	0	7	0	1,5	0	8	36	1 980	6,62	0,113	12,3	70,3	26,2	1,81
18	α	1800	0	7	0	1,5	0	8	32	1 234	7,82	0,162	11,0	81,0	26,9	1,86

Таблица 2. Продължение

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
19	0	1500	-α	5	0	1,5	0	8	12	835	6,57	0,040	11,2	16,9	31,6	2,19
20	0	1500	α	9	0	1,5	0	8	25	935	8,80	0,180	6,4	56,2	20,6	1,43
21	0	1500	0	7	-α	0	0	8	32	1 435	6,56	0,060	8,2	21,0	20,4	1,41
22	0	1500	0	7	α	3	0	8	40	1 276	8,22	0,050	7,0	33,0	30,2	2,09
23	0	1500	0	7	0	1,5	-α	0	40	1 655	7,22	0,040	10,3	23,1	20,2	1,40
24	0	1500	0	7	0	1,5	α	16	26	1 660	7,03	0,040	10,5	28,8	28,1	1,94
25	0	1500	0	7	0	1,5	0	8	21	1 290	7,20	0,060	11,0	23,8	29,5	2,04
26	0	1500	0	7	0	1,5	0	8	24	1 380	7,30	0,004	9,0	22,6	28,5	1,97
27	0	1500	0	7	0	1,5	0	8	22	1 355	7,40	0,050	10,4	22,8	28,0	1,94
28	0	1500	0	7	0	1,5	0	8	26	1 345	7,20	0,060	10,5	23,2	28,6	1,98
29	0	1500	0	7	0	1,5	0	8	21	1 325	7,30	0,070	10,2	22,4	28,9	2,00
30	0	1500	0	7	0	1,5	0	8	24	1 310	7,30	0,040	10,4	22,9	29,1	2,01
31	0	1500	0	7	0	1,5	0	8	24	1 355	7,30	0,060	9,2	23,3	29,3	2,03

Определянето на отделните членове на регресионните уравнения е направено съгласно с методиката, дадена в [4].

Получените след статистическата обработка на резултатите уравнения имат следния вид (за NO_x):

$$NO_x = 1374 - 189,5 \cdot x_1 + 38,6 \cdot x_2 - 41,7 \cdot x_3 - 42,6 \cdot x_4 - 42,6 \cdot x_1 \cdot x_2 + 40,3 \cdot x_1 \cdot x_3 - 52,9 \cdot x_1 \cdot x_4 - 113,1 \cdot x_2 \cdot x_3 + 10,4 \cdot x_2 \cdot x_4 - 8,3 \cdot x_3 \cdot x_4 + 71,4 \cdot x_1^2 - 124,9 \cdot x_2^2 + 85,2 \cdot x_4^2 \quad (3)$$

Тук ще представим само анализа на уравнението, описващо NO_x . За да се определят оптималните стойности на факторите е необходимо да се реши система от уравнения, включващи частните производни на функцията $g_6(x_1, x_2, x_3, x_4)$ спрямо съответните променливи:

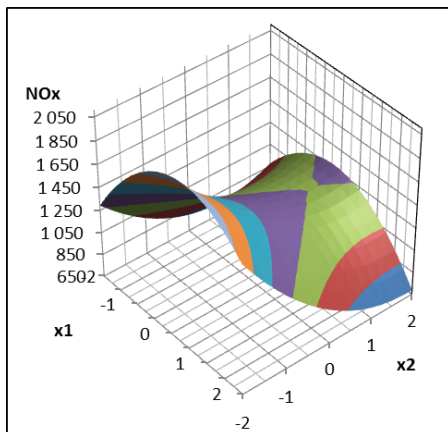
$$\begin{aligned} \frac{\partial NO_x}{\partial x_1} &= 142,8 \cdot x_1 - 42,6 \cdot x_2 = 40,3 \cdot x_3 - 52,9 \cdot x_4 - 189,5; \\ \frac{\partial NO_x}{\partial x_2} &= -42,6 \cdot x_1 - 249,8 \cdot x_2 - 113,1 \cdot x_3 - 83,6 \cdot x_4 + 38,6 \\ \frac{\partial NO_x}{\partial x_3} &= 40,3 \cdot x_1 - 113,1 \cdot x_2 - 105,4 \cdot x_4 - 41,7 \\ \frac{\partial NO_x}{\partial x_4} &= -52,9 \cdot x_1 - 83,6 \cdot x_2 - 105,4 \cdot x_3 + 170,4 \cdot x_4 \end{aligned} \quad (4)$$

Решението на системата (3) дава следните резултати:

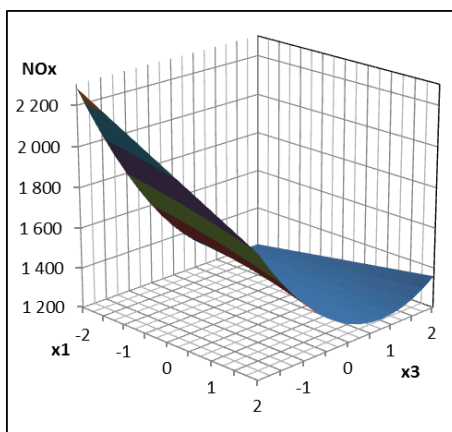
$$x_1 = 1,42 = 1713 \text{ min}^{-1}, x_2 = -0,15 = 6,85 \text{ kgf} \cdot \text{m}, x_3 = -0,09 = 14,3 \%, x_4 = 0,31 = 9,24 \% \quad (5)$$

Минималната стойност на NO_x в разглежданите диапазони на факторите е 1238 ppm (стойностите на факторите $x_1 \neq x_4$ е в кодирани и естествени единици).

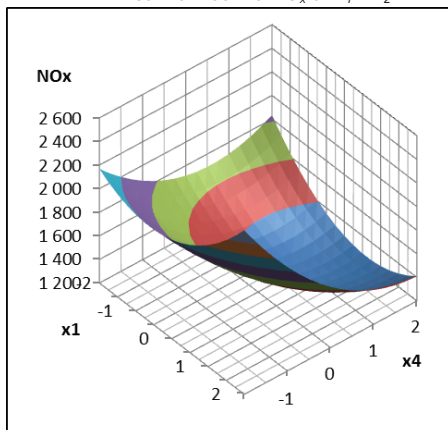
Регресионното уравнение е 4-факторно, а в тримерното пространство могат да се строят само уравнения, зависещи от два параметъра (фактора) – $z=F(x,y)$. За да се илюстрира хода на повърхнините на получените резултати, е необходимо да се направи съответното полагане на излишните фактори. Може да се избере произволна стойност от диапазона на изменение на съответния фактор и тя да бъде заместена в регресионното уравнение. Най-лесно е *излишните* фактори да се приемат на основното си ниво, т.е. в кодирани стойности равни на нула. Така и са създадени съответните графици (показани са само за NO_x , за останалите величини се постъпва по аналогичен по аналогичен начин) (фиг. 2+7).



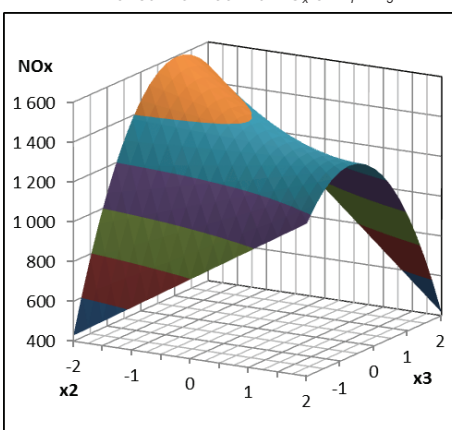
Фиг. 2. Зависимост на NO_x от x_1 и x_2



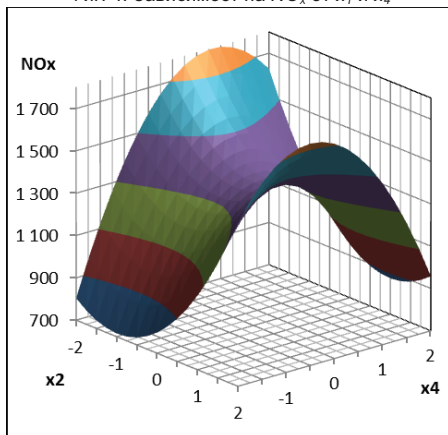
Фиг. 3. Зависимост на NO_x от x_1 и x_3



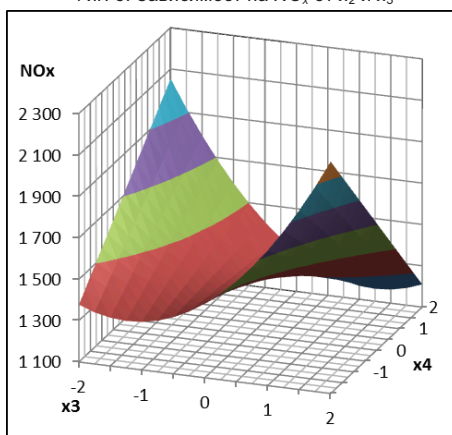
Фиг. 4. Зависимост на NO_x от x_1 и x_4



Фиг. 5. Зависимост на NO_x от x_2 и x_3



Фиг. 6. Зависимост на NO_x от x_2 и x_4



Фиг. 7. Зависимост на NO_x от x_3 и x_4

От анализа на опитните резултати следват изводите:

1. Алтернативните горива увеличават срока на използване на изкопаемите горива, което е особено благоприятно в световен мащаб;
2. Биодизеловото гориво увеличава отделянето на NO_x на режимите на работа на двигателя $\geq 50\%$ от номиналните, поради по-голямото количество кислород в него;
3. Прилагането на РОГ на повечето режими на работа на двигателя влошава параметрите му;
4. За режими $\geq 50\%$ от номиналните, използването на РОГ намалява съдържанието на NO_x до $10+20\%$;
5. Максималната стойност на РОГ не трябва да е по-голяма от $10+15\%$;
6. РОГ, в съчетание и с другите методи за намаляване на вредните вещества, е особено перспективен метод в борбата за опазване на чиста околната среда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опитите показват, че РОГ е ефективно средство за намаляване на съдържанието на NO_x в режимите на частично натоварване на двигателя. Получените експериментални резултати доказват, че за намаляването на NO_x в дизеловите двигатели при някои режими на натоварвания е целесъобразно да се управлява не гориво-въздушното отношение α , а степента на РОГ. Този подход води до известно повишаване на специфичния разход, частично увеличаване на количествата на другите токсични компоненти в ОГ и известно влошаване на икономическите и мощностните параметри на двигателя, но намаляването на NO_x оправдава използването на РОГ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Димитров А. Й., Алтернативни горива за ДВГ решения и проблеми, НТС по машиностроене, машини, технологии, материали, бр.1 2007г..
- [2] Маринов Е., А. Трендафилов и др. Биогоривото - реално алтернативно гориво за транспорта. МOТAУTО '06, Варна, 2006.
- [3] Magín Lapuerta, Octavio Armas, José Rodríguez-Fernández. Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions. Progress in Energy and Combustion Science, Volume 34, Issue 2, April 2008, Pages 198-223
- [4] Спирин Н. А. и др. Методи планирования и обработки результатов инженерного эксперимента, Екатеринбург, 2003.
- [5] Копчев П., Маринов Е., Цветанков Л.Й., Копчев В. Използване на биопродукти като съставка и заместител на стандартно дизелово гориво."МОТOАУTО '02".

За контакти:

доц. д-р Атанас Илиев, РУ „Ан. Кънчев“, гр.Русе, ул. "Студентска" 8, пк. 7017, тел. 082-888-272, e-mail: ailliev@abv.bg
гл.ас. инж. Петър Казаков, Тракийски университет, Факултет „Техника и технологии“ Ямбол 8600, e-mail: peter_yb@abv.bg
проф. д-р Емил Маринов, РУ „Ан. Кънчев“, гр.Русе, ул. "Студентска" 8, пк. 7017, e-mail: emarinov@ru.acad.bg

Докладът е рецензиран.