

УДК 621.436

**ПАРАМЕТРЫ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ
В ДИЗЕЛЕ, РАБОТАЮЩЕМ НА СМЕСЯХ
ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА И БУТАНОЛА**

**THE PARAMETERS OF EXHAUST GAS RECIRCULATION IN A
DIESEL ENGINE, RUNS ON A MIXTURE OF DIESEL AND BUTANOL**

Кухарёнок Г.М., доктор технических наук, профессор;

Петрученко А.Н., кандидат технических наук, доцент;

Гершань Д.Г., старший преподаватель

(Белорусский национальный технический университет)

Kukharenok G.M., Doctor of Technical Sciences, Professor;

Petruchenko A.N., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;

Hershan D.G., Senior Lecturer

(Belarusian National Technical University)

Аннотация. *Проведены расчетные исследования. Получены регрессионные зависимости показателей рабочего процесса дизеля от параметров рециркуляции отработавших газов. Установлены параметры рециркуляции отработавших газов дизеля, работающего на смесях дизельного топлива бутанолом, обеспечивающие выбросы оксидов азота на уровне Евро-5.*

Abstract. *Conducted computational studies. Obtained regression parameters according to the working process of a diesel engine on the parameters of exhaust gas recirculation. The parameters of the recycling exhaust gases of a diesel engine running on diesel butanol mixtures to ensure the emissions of nitrogen oxides at the Euro-5.*

При использовании смесей дизельного топлива и бутанола на режимах 100 и 75 % нагрузки 13-ступенчатого цикла ESC (A75, A100, B75, B100, C75, C100) наблюдается рост выбросов оксидов азота (NO_x) [1]. В результате суммарные выбросы NO_x оказываются выше норм, установленных Евро-5.

С целью установления возможности снижения выбросов NO_x за счет увеличения количества рециркулируемых газов при использовании смесей дизельного топлива с бутанолом были проведены расчетные исследования.

Нижние значения пределов изменения цикловой подачи топлива и степени рециркуляции соответствовали работе на дизельном топливе [2]. Верхние пределы определились расчетом при использовании смесей с содержанием бутанола до 30 % (таблица 1).

Расчеты проводились для смесевоего топлива, в котором содержание бутанола последовательно увеличивалось на 5%. Продолжительность впрыска топлива в процессе расчетных исследований не изменялась и со-

ответствовала значениям, принятым при моделировании рабочего процесса с использованием дизельного топлива.

Таблица 1 – Верхние пределы изменения цикловой подачи топлива и степени рециркуляции

Параметры	Режимы					
	A75	A100	B75	B100	C75	C100
g_{it} , мм ³	118	160	128	180	134	172
ρ_p , %	19	30	30	28	19	18

На рисунке 1 представлены зависимости среднего индикаторного давления (p_i), удельного индикаторного расхода топлива (g_i) и выбросов оксидов азота от степени рециркуляции и цикловой подачи при содержании в смеси 5 % бутанола для режима 75 % нагрузки 13-ступенчатого цикла.

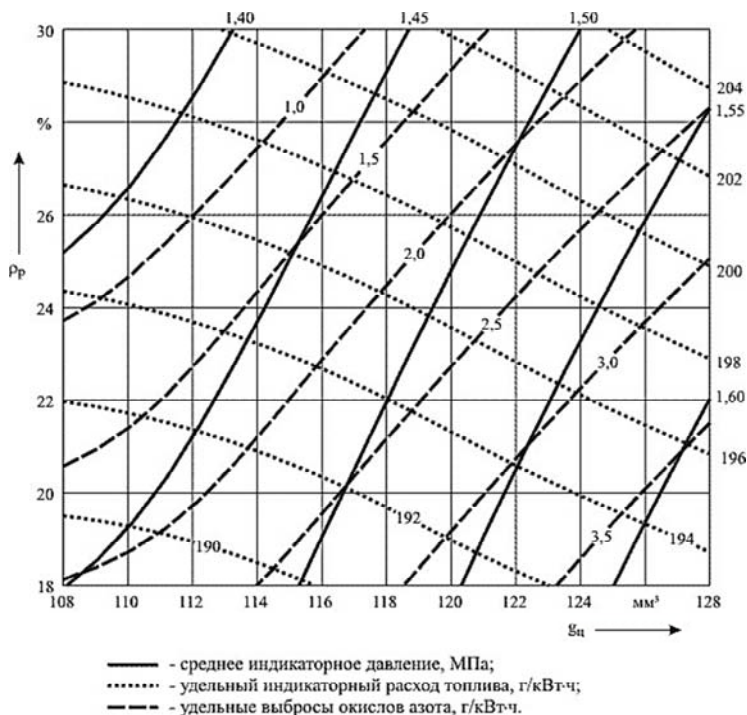


Рисунок 1 – Зависимости p_i , g_i и NO_x от степени рециркуляции и цикловой подачи при содержании в смеси 5 % бутанола для режима A75 ($n = 1400 \text{ мин}^{-1}$)

Для других режимов характер кривых практически одинаков. Увеличение количества рециркулируемых газов в цилиндре дизеля при неизменной цикловой подаче топлива приводит к снижению p_i и NO_x и росту g_i . Ухудшение мощностных и топливно-экономических показателей дизеля обусловлено увеличением количества отработавших газов в цилиндре, которые имеют более высокую теплоемкость по сравнению с воздухом, что приводит к повышению потерь теплоты. Рост тепловых потерь ведет к снижению максимальной температуры цикла. В результате снижаются выбросы NO_x . Максимальная температура в зависимости от цикла и количества подаваемого топлива уменьшается в среднем на $170\text{--}240^\circ$. Снижение максимальной температуры происходит при незначительном повышении максимального давления цикла. Это вызвано увеличением количества газов участвующих в рабочем цикле.

Изменение мощностных и топливо экономичеких показателей в зависимости от степени рециркуляции индивидуально для каждого из режимов. Так для режима A75 увеличение степени рециркуляции с 11 до 19 % ведет к росту g_i и снижению $p_i \sim 2,5\%$ при цикловой подаче топлива 102 мм^3 . Для цикловой подачи 118 мм^3 ухудшение показателей g_i и p_i составляет $\sim 3\%$. При моделировании рабочего процесса с учетом параметров, соответствующих режиму A100, показатели g_i и p_i ухудшаются при увеличении степени рециркуляции с 18 % до 28 % более чем на 5,5 % при цикловой подаче 144 мм^3 и на 7 % при $g_{\text{ц}}$ равном 160 мм^3 . Для других рассматриваемых режимов снижение p_i и увеличение g_i составляет 5–7 % при соответствующем увеличении степени рециркуляции отработавших газов.

Характер изменения выбросов оксидов азота в зависимости от ρ_p и $g_{\text{ц}}$ во многом повторяет зависимости изменения p_i , однако динамика роста NO_x по мере повышения $g_{\text{ц}}$ ниже приращения величины среднего индикаторного давления, что указывает на возможность выбора таких значений $g_{\text{ц}}$ и ρ_p , при которых выбросы оксидов азота не будут превышать значений экологического уровня Евро-5.

В свою очередь рост $g_{\text{ц}}$ при постоянном количестве рециркулируемых газов сопровождается повышением p_i , NO_x и g_i . Увеличение g_i при росте p_i обусловлено снижением коэффициента избытка воздуха, при этом происходит увеличение максимальной температуры цикла. Для режимов с 75 % нагрузкой рост максимальной температуры цикла в пределах изменения цикловой подачи составляет $90\text{--}120^\circ$ (5–7 %), а для режимов 100 % нагрузки рост температуры находится в пределах $50\text{--}100^\circ$ (3–6 %). Большие значения соответствуют режимам с большими диапазонами изменения $g_{\text{ц}}$.

Проведенные исследования показывают, что для смесевых топлив, содержащих бутанола существует такое сочетание $g_{\text{ц}}$ и ρ_p при которых вы-

бросы оксидов азота будут соответствовать Евро-5. Для определения требуемых сочетаний $g_{ц}$ и ρ_p были получены регрессионные зависимости.

Они представлены в виде полинома второго порядка [3]:

$$y = a_0 + a_1 \cdot \delta'_{\text{б\у\т}} + a_2 \cdot \rho'_p + a_3 \cdot g'_{ц} + a_{11} \cdot \delta'^2_{\text{б\у\т}} + a_{22} \cdot \rho'^2_p + a_{33} \cdot g'^2_{ц} + a_{12} \cdot \delta'_{\text{б\у\т}} \cdot \rho'_p + a_{13} \cdot \delta'_{\text{б\у\т}} \cdot g'_{ц} + a_{23} \cdot \rho'_p \cdot g'_{ц}, \quad (1)$$

где $a_0 \dots a_{23}$ – коэффициенты регрессии;

$\delta'_{\text{б\у\т}}$, ρ'_p , $g'_{ц}$ – приведенные значения, соответственно концентрации бутанола в смеси, степени рециркуляции и цикловой подачи топлива.

Диапазоны изменения параметров $g_{ц}$ и ρ_p соответствуют значениям, приведенным в таблице 1, а концентрация бутанола в смеси изменяется от 0 до 30 %. Эксперимент проведен в соответствии с D оптимальным планом [3].

Значения показателей p_i , g_i и NO_x были получены расчетом. Для определения коэффициентов регрессии использовался метод наименьших квадратов, основные положения методики расчета и оценки значимости коэффициентов регрессии приведены в работе [3]. В таблице 2 приведены значения коэффициентов регрессии, аппроксимирующей изменение показателей p_i , g_i и NO_x , максимальной температуры и давления цикла и коэффициента избытка воздуха для смесового топлива с содержанием бутанола до 30 %.

Таблица 2 – Значения коэффициентов регрессии, аппроксимирующих изменение показателей работы дизеля на режиме А75

	p_i	g_i	NO_x	p_z	T_{max}	α
a_0	1,487148	187,3653	2,936211	12,14781	1767,678	2,010885
a_1	-0,05072	5,467778	-0,36864	-0,11467	-33,8389	0,086999
a_2	-0,02178	2,741944	-0,59314	-0,04744	-55,6833	0,056623
a_3	0,095167	1,637389	1,497086	0,269278	58,32222	-0,16268
a_{11}	5,56E-05	0,184	0,000796	0,003556	-0,65	0,002973
a_{22}	-0,00011	0,0605	0,07424	0,024889	-1,98333	0,003752
a_{33}	-0,00194	0,131833	-0,13504	-0,03794	-1,76667	0,01176
a_{12}	0,001333	-0,00225	0,182556	0,017333	-0,05833	0,004264
a_{13}	-0,00233	-0,07092	-0,15002	-0,01825	-0,725	-0,00618
a_{23}	-0,00267	0,184417	-0,15141	-0,01817	-1,11667	-0,00791

Для определения требуемого сочетания параметров $g_{ц}$ и ρ_p для выбранных концентрацией бутанола в смеси использована надстройка «Поиск решения» приложения Microsoft Office Excel.

С помощью, предложенного надстройкой «Поиск решения», «Эволюционный поиск решения», для режимов 75 и 100 % нагрузки 13-ступенчатого цикла, были последовательно определены значения g_d и ρ_p (таблица 3) дизеля, работающего на смесевом топливе с изменением концентрации бутанола в пределах от 0 до 30 %.

Таблица 3 – Значения степени рециркуляции отработавших газов и цикловой подачи топлива для смесей с различным содержанием бутанола

Параметры	Концентрация бутанола в смеси $\delta_{бвт}$, %							Режим
	0	5	10	15	20	25	30	
ρ_p , %	11	12,56	13,33	14,9	15,68	16,44	17,45	A75
$g_{ц}$, мм ³	104	105,9	107,55	109,65	111,4	113,2	115,3	
ρ_p , %	18	18,6	19,3	19,3	20,25	20,17	20,1	A100
$g_{ц}$, мм ³	144	146,1	148,95	150,95	154,1	156,33	158,65	
ρ_p , %	20,8	22,2	23,1	24,4	25,2	26	27,1	B75
$g_{ц}$, мм ³	108	110,1	112	114,2	116,2	118,2	120,9	
ρ_p , %	22	22,3	22,9	23,99	24,67	25,1	25,33	B100
$g_{ц}$, мм ³	158,8	160,1	164,45	167,95	171,08	174	177,81	
ρ_p , %	11	12,96	14,94	16,42	16,92	17,4	18,66	C75
$g_{ц}$, мм ³	118	120	122,7	125,29	127,6	129,63	132,4	
ρ_p , %	0,11	12,2	13,13	14,36	15,4	16,95	17,37	C100
$g_{ц}$, мм ³	150	152,8	155,6	158,83	162	166,2	170	

Проведенные исследования позволили определить параметры рециркуляции отработавших газов, обеспечивающие приведенные выбросы NO_x дизеля на уровне Евро-5. В тоже время использование смесевых топлив приводит к увеличению удельного индикаторного расхода топлива [g_i] по сравнению с дизельным топливом (таблица 4). Величины [g_i] рассчитаны с учетом весовых коэффициентов, используемых при расчете [NO_x].

Таблица 4 – Приведенные значения [NO_x] и [g_i]

Показатели	Концентрация бутанола в смеси $\delta_{бвт}$, %						
	0	5	10	15	20	25	30
NO_x , г/(кВт·ч)	1,999	1,986	1,985	1,974	1,974	1,961	1,963
ΔNO_x , г/(кВт·ч)	0,0	0,013	0,014	0,024	0,024	0,038	0,035
δ_{NO_x} , %	0,0	0,7	0,7	1,2	1,2	1,9	1,8
g_i , г/(кВт·ч)	184,9	188,0	190,5	193,3	195,9	198,6	201,6
Δg_i , г/(кВт·ч)	0,0	3,1	5,6	8,4	11,0	13,7	16,7
δ_{g_i} , %	0,0	1,7	3,1	4,5	6,0	7,4	9,0

Литература

1. Кухарёнок, Г.М. Показатели работы дизеля с рециркуляцией отработавших газов при применении спиртосодержащих топлив [Текст] / Кухаренко Г.М, Петрученко А.Н. // Совершенствование организации дорожного движения и перевозок пассажиров и грузов: сборник научных трудов / Филлиал БНТУ «Научно-исследовательская часть». – Минск, 2014. – С. 203–207.
2. Кухаренко, Г.М. Снижение выбросов вредных веществ дизельных двигателей [Текст] / Г.М. Кухаренко, А.Н. Петрученко, В.И. Березун. – Минск, 2013. – 248 с.
3. Хартман, К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов [Текст] / К. Хартман [и др.]. – Москва: Мир, 1977. – 552 с.

УДК 621. 436

ПОКАЗАТЕЛИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДИЗЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО НА СМЕСЯХ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА И МЕТИЛОВОГО ЭФИРА ЖИРНЫХ КИСЛОТ РАПСОВОГО МАСЛА

INDICATORS WORKING PROCESS OF A DIESEL ENGINE RUNNING ON DIESEL OIL, AND MIXTURES OF THE METHYL ESTER OF RAPESEED OIL FATTY ACIDS

Кухарёнок Г.М., доктор технических наук, профессор;
Петрученко А.Н., кандидат технических наук, доцент;
Капский Д.В., доктор технических наук, доцент
(Белорусский национальный технический университет)

Kukharenok G.M., Doctor of Technical Sciences, Professor;
Petruchenko A.N., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;
Kapski D.V., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor
(Belarusian National Technical University)

Аннотация. *Получены экономические и мощностные показатели дизеля при работе на смесях дизельного топлива и метилового эфира жирных кислот рапсового масла, а также характеристики топливоподачи и процесса сгорания. С ростом концентрации метилового эфира увеличивается максимальное давление впрыска топлива, снижается период задержки воспламенения, повышается максимальная скорость сгорания топлива, снижается среднее индикаторное давление и увеличивается удельный индикаторный расход топлива.*

Abstract. *The economic and power characteristics of the diesel engine when operating on mixtures of diesel fuel and methyl ester of fatty acids of rapeseed*