

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДИЗЕЛЯ С УЧЕТОМ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ

Доктор технических наук Кухаренок Г.М., кандидат технических наук Петрученко А.Н.

Предложена математическая модель рабочего процесса, учитывающая рециркуляцию ОГ и выполнена оценка влияния параметров системы рециркуляции на показатели рабочего процесса и содержание NO_x . Определены параметры рециркуляции, обеспечивающие средневзвешенное содержание окислов азота в отработавших газах $1,95 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$.

A mathematical model of diesel engine cycle to consider exhaust recirculation to estimate impact of an exhaust recirculation characteristics of diesel engine cycle performance and impact on NO_x - emission is proposed. The exhaust gas recirculation characteristics is determined to provide a wighted average NO_x - emission in exhaust gas $1,95 \text{ gram}/(\text{kW})$

Современную цивилизацию трудно представить без автомобильного транспорта. Обратной стороной высокого жизненного уровня, обусловленного развитой транспортной инфраструктурой, является ухудшение среды обитания человека, вызванное загрязнением окружающей среды вредными веществами, содержащихся в отработавших газах дизельных двигателей, получивших широкое применение в силовых установках автомобилей.

Наибольшую опасность для живых организмов представляют окислы азота, содержащиеся в ОГ. Снижение количества этих побочных продуктов, процесса сгорания топлива в двигателях внутреннего сгорания, является важной научно-технической задачей. Известно несколько методов уменьшения содержания окислов азота в ОГ.

Одним из действенных методов снижения эмиссии окислов азота (NO_x) является применение рециркуляции ОГ, заключающееся в возвращении части ОГ из выпускной системы в цилиндр двигателя и смешивании их со свежим зарядом.

При рециркуляции ОГ в цилиндр вместе с воздухом поступает химически инертный газ с высокой удельной теплоемкостью. Снижение токсичности ОГ обусловлено как воздействием на рабочий процесс (РП), так и снижением общей массы ОГ, выбрасываемых в атмосферу. Воздействие на РП заключается в запаздывании начала сгорания и замедлении его развития, что приводит к снижению температур сгорания, а это в свою очередь способствует уменьшению эмиссии окислов азота.

Эффективность этого метода снижения NO_x определяется согласованной с режимом работы двигателя подачей требуемого количества ОГ. Быстрый мало затратный поиск параметров ОГ и системы рециркуляции, обеспечивающих выполнение поставленных условий снижения окислов азота возможен в случае рационального сочетания расчетных и экспериментальных исследований.

Количество перепускаемых ОГ оценивается степенью рециркуляции ρ_p :

$$\rho_p = \frac{G_p}{G_p + G_E}, \quad (1)$$

где G_p – массовый расход рециркулируемых ОГ;

G_E – массовый расход воздуха, поступающего в цилиндр. –

Достоверность расчетных исследований определяется адекватностью разработанной математической модели рабочего процесса, учитывающей теплофизические свойства ОГ [1, 2].

Наличие рециркулируемых газов в цилиндре дизеля приводит к изменению параметров, обуславливающих условия протекания рабочего процесса. Меняется, прежде всего, температура конца впуска, так как температура рециркулируемых газов даже при условии их охлаждения выше температуры воздуха, поступающего в двигатель. На величину коэффициента избытка воздуха, рециркуляция также оказывает влияние, так с газами поступают не только продукты сгорания, но и оставшийся кислород с азотом, а наличие в смеси достаточного большого количества продуктов сгорания приводит к изменению коэффициента молекулярного изменения.

Температуру конца впуска в первом приближении можно определить из выражения:

$$T_a = \frac{T_0 + \Delta T + \gamma_r \cdot T_r + \frac{\rho_p}{\rho_p - 1} \cdot T_{\text{реци}}}{1 + \gamma_r + \frac{\rho_p}{\rho_p - 1}}, \quad (3)$$

где T_0 , ΔT , T_r , $T_{\text{реци}}$ – соответственно температуры окружающей среды, подогрева свежего заряда во впускных каналах трактах, остаточных и рециркулируемых газов;

γ_r – коэффициент остаточных газов;

Для расчета коэффициента избытка воздуха требуется учесть кислород, поступивший с рециркулируемыми газами. Количество кислорода в отработавших газах в случае полного сгорания определяется самой величиной коэффициента избытка воздуха. Следовательно, содержание кислорода в отработавших газах может быть определено из уравнения.

$$M_0 = \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) \cdot \left(\frac{g_C}{12} + \frac{g_H}{2} - \frac{g_O}{32}\right), \quad (4)$$

где g_C , g_H , g_O – соответственно массовые доли углерода, водорода и кислорода в топливе;

α – коэффициент избытка воздуха.

Количество кислорода, поступившего в цилиндр с рециркулируемыми газами, определяется степенью рециркуляции и может быть найдено из уравнения:

$$M_0^{\text{реци}} = M_0 \cdot \frac{\rho_p}{\rho_p - 1} \cdot \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) = \frac{\rho_p}{\rho_p - 1} \cdot \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) \cdot \left(\frac{g_C}{12} + \frac{g_H}{2} - \frac{g_O}{32}\right) \quad (5)$$

В рециркулируемых газах достаточно азота, для того чтобы объединив его с имеющимся кислородом можно было выделить эквивалентный воздуху состав газов:

$$M_0^{\text{реци}} = \frac{1}{0,21} \cdot M_0 \cdot \frac{\rho_p}{\rho_p - 1} \cdot \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) = \frac{1}{0,21} \cdot \frac{\rho_p}{\rho_p - 1} \cdot \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) \cdot \left(\frac{g_C}{12} + \frac{g_H}{2} - \frac{g_O}{32}\right) \quad (6)$$

Суммарное количество воздуха находящееся в начале процесса сжатия равно:

$$M_1 = \frac{1}{0,21} \cdot (M_0^{\text{реци}} + M_0^{\text{св}}) = \frac{1}{0,21} \cdot \left(\alpha + \frac{\rho_p}{\rho_p - 1} \cdot \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right)\right) \cdot \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) \cdot \left(\frac{g_C}{12} + \frac{g_H}{2} - \frac{g_O}{32}\right) \quad (7)$$

С учетом результатов расчета уточняется коэффициент избытка воздуха:

$$\alpha' = \frac{M_1}{l_0} \quad (8)$$

l_0 – теоретически необходимое количество воздуха для сгорания порции топлива поданной в цилиндр.

Коэффициент молекулярного изменения в случае наличия рециркуляции находится из выражения:

$$\mu_0 = \frac{M_2 + M_r + M_{\text{реци}}^{\text{н}}}{M_1 + M_r + M_{\text{реци}}^{\text{н}}}, \quad (9)$$

где M_2 , M_r , $M_{\text{реци}}^{\text{н}}$ – количество газов соответственно образовавшихся в результате сгорания топливовоздушной смеси, остаточных и рециркулируемых.

После преобразований выражение (9) для коэффициента молекулярного изменения будет иметь вид:

$$\mu = \frac{\mu_0 + \gamma_r + \frac{\rho_p}{\rho_p - 1} \cdot \mu_0}{1 + \gamma_r + \frac{\rho_p}{\rho_p - 1} \cdot \mu_0} \quad (10)$$

Показатель NO_x является интегральным, включающим в себя количество образовавшихся за период сгорания окислов азота NO_2 , NO , и азотной кислоты HNO_3 . Массовые показатели каждой из составляющих определяются из парциальных давлений [3]. Сначала находят мольное содержание окислов азота и азотной кислоты, а затем, учитывая атомарные массы каждого соединения, рассчитывают массы составляющих и в завершение суммируют полученные результаты.

Часовой выход окислов азота рассчитывается с помощью уравнения:

$$\sum m_{NO_x} = 120 \cdot m_{NO_x} \cdot i \cdot \frac{n}{\tau} \quad (11)$$

где m_{NO_x} - количество NO_x , образовавшихся в цилиндре за время протекания рабочего цикла;
 i - количество цилиндров двигателя;
 n - частота вращения коленчатого вала;
 τ - тактность двигателя.

Как показывают исследования, влияние рециркуляции на показатели рабочего цикла имеет сложный и не однозначный характер, с одной стороны снижается содержание окислов азота, а с другой ухудшается экономичность двигателя. Эффективность работ по поиску компромиссных решений значительно повышается в случае использования методов планирования эксперимента. Для определения параметров рециркуляции обеспечивающих требуемые показатели работы дизельного двигателя использовался насыщенный близкий к D-оптимальному плана для четырех факторов [4].

Расчетные исследования проводились для автомобильного дизельного двигателя 4ЧН 11×12,5 номинальной мощностью 140 кВт при частоте вращения коленчатого вала двигателя 2300 мин⁻¹ с целью достижения норм Евро-5 по выбросам окислов азота.

Реализация принятого плана требует проведения 15 численных экспериментов на каждом режиме испытаний по европейскому стационарному циклу (ESC). В качестве факторов эксперимента приняты: степень рециркуляции ρ_p , температура рециркулируемых ОГ T_r , часовой расход воздуха G_E и цикловая подача топлива $q_{ц}$.

Например, для режима B75 цикла ESC с учетом результатов исследований пределы изменения степени рециркуляции были приняты равными 0...30%; температуры рециркулируемых ОГ 300...500 К; часового расхода воздуха 430...490 кг/ч, цикловой подачи топлива 98...112 мм³.

Обработка результатов численного эксперимента позволила определить коэффициенты уравнения регрессии второго порядка для коэффициента избытка воздуха, давления наддува, среднего индикаторного давления, удельного индикаторного расхода топлива и удельного содержания NO_x в ОГ при четырех изменяемых параметрах.

Задавись ограничениями оценочных показателей: коэффициент избытка воздуха $\alpha > 1,4$, среднее индикаторное давление $P_i > 1,4$ МПа, давление наддува $P_k < 0,320$ МПа, удельный индикаторный расход топлива $g_i < 200$ г/(кВт·ч) с помощью уравнений регрессии определяем величины степени рециркуляции, T_r , G_E и $q_{ц}$, обеспечивающие минимальную величину NO_x . Значения степени рециркуляции, температуры рециркулируемых ОГ, часового расхода воздуха и цикловой подачи топлива при этом соответственно равны 20,8%, 340 К, 463 кг/ч, 108 мм³/цикл.

Аналогичным образом найдены сочетания параметров рециркуляции, массового расхода топлива и воздуха, обеспечивающие снижение удельных выбросов окислов азота и достижение требуемых значений среднего индикаторного давления на оставшихся 12 режимах испытаний (см. табл. 2). В таблице также приведены полученные значения часового расхода топлива G_m , угла

опережения впрыска топлива Θ , температуры воздуха после охладителя T_a , температуры отработавших газов T_{OG} и максимального давления сгорания P_z .

Оценка достигнутого уровня содержания NO_x в ОГ осуществлялась по средневзвешенному значению, рассчитываемому с помощью зависимости:

$$g_{NO} = \sum K_i \cdot g_{i,NO} \quad (12)$$

где K_i – коэффициент весомости.

В результате проведенных исследований определены значения степени рециркуляции, температуры рециркулируемых ОГ, расхода топлива и воздуха для 13-ступенчатого цикла, обеспечивающие средневзвешенный выход окислов азота $1,95$ г/(кВт·ч).

Таблица 2 – Результаты моделирования 13-ступенчатого цикла испытаний ESC

Наименование параметра	Режимы испытаний												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	xx	A100	B50	B75	A50	A75	A25	B100	B25	C100	C25	C75	C50
G_z , кг/ч	60	456	402	463	289	389	171	592	241	696	325	604	524
G_m , кг/ч	0,89	20,3	13,7	18,5	10,3	14,7	5,8	27,3	7,1	30,7	9,88	23,8	16,17
q_u , мм ³ /цикл	11	144	80	108	73	104	41	159	41	152	49	118	80
n , мин ⁻¹	800	1400	1700	1700	1400	1400	1400	1700	1700	2000	2000	2000	2000
Θ , град п.к.в.	3	3	3	3	3	3	3	3	4	5	5	5	5
T_a , К	315	320	320	320	320	320	320	320	320	320	320	320	320
T_{OG} , К	440	880	720	800	720	790	620	900	630	900	630	820	710
P_F , %	40	18	43	20,8	12	11	48	22	55	11	50	12	30
T_r , К	340	340	340	340	340	340	340	340	340	340	340	340	340
P_k , МПа	-	0,283	0,21	0,23	0,186	0,25	0,12	0,29	0,13	0,31	0,16	0,28	0,229
α	7,59	1,73	3,14	2,01	2,12	1,99	2,94	1,69	4,52	1,69	4,26	1,91	3,03
P_i , МПа	0,18	1,92	1,04	1,45	1,054	1,48	0,53	1,99	0,57	1,99	0,67	1,64	1,08
g_i , г/кВт ч	-	190,9	194	189	176,2	178	197	203	189	190	187	183	186,3
P_z , МПа	3,9	13,9	10,9	10,9	10,3	12,1	7,9	13,6	9,5	13,6	10,7	12,1	10,8
m_{NOx} , г/ч	7,59	288,7	119	159	170,6	232	97,2	250	54,7	309	98,8	140	179
g_{NOx} , г/кВт ч	-	3,015	1,88	1,82	3,242	3,13	3,68	2,07	1,56	2,24	2,08	1,94	2,33
K_{ESC}	0,15	0,08	0,1	0,1	0,05	0,05	0,05	0,09	0,1	0,08	0,05	0,05	0,05

Литература

1. Кухаренок, Г.М. Расчет рабочего процесса комбинированного дизеля [Текст] / Г.М. Кухаренок, А.Н. Петрученко, Д.Г. Гершань // Материалы Международной научной конференции, посвященной 60-летию автотракторного факультета и 50-летию кафедры «Двигатели внутреннего сгорания» 24-28 октября 2011 г. – Минск. 2011. – С. 137-143.
2. Кухаренок, Г.М. Рабочий процесс высокооборотных дизелей. Методы и средства совершенствования. [Текст] / Г.М. Кухаренок Минск: БГПА, 1999. – 179 с.
3. Звонов, В.А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания [Текст] / В.А. Звонов – М.: Машиностроение, 1981. – 160 с.
4. Хартман, К. планирование эксперимента в исследовании технологических процессов [Текст] / К. Хартман, Э. Лецкий, Э. Шефер и др. – М.: Из-во “Мир”, 1977. – 552 с.