

АНАЛИЗ СОСТАВА ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДИЗЕЛЯ KM-170FA

А.А. Обозов, д.т.н., профессор,
М.А. Новиков, аспирант, П.А. Гришанов, магистрант
Брянский государственный технический университет

Представлены результаты анализа состава отработавших газов (ОГ) промышленного дизельного двигателя, выполненного на основе данных, полученных при проведении лабораторных (стендовых) испытаний. Испытания проведены в поле возможных режимов работы двигателя с целью оптимального размещения эксплуатационной характеристики приводного агрегата. Рассмотрены вопросы аппроксимации универсальных характеристик концентраций вредных компонентов ОГ для их графического представления в трехмерной системе координат.

В последние десятилетия наибольшее внимание уделяется проблеме сохранения окружающей среды и в частности снижению ее загрязнения, вызываемого техногенной деятельностью человека.

Одним из источников загрязнения продолжают оставаться двигатели внутреннего сгорания (ДВС), используемые в качестве источников механической энергии для привода транспортных средств. При работе ДВС с отработавшими газами в атмосферу выбрасываются такие вредные (токсичные) компоненты, как оксиды азота (NO_x), монооксид углерода (CO), несгоревшие углеводороды (CH), сажа (C) и пр. Выбросы двуокиси углерода (CO_2) нетоксичны, однако они также наносят вред окружающей среде (вызывают так называемый «парниковый эффект»). Качественный и количественный состав отработавших газов ДВС в настоящее время достаточно хорошо изучен, а также изучены методы снижения их воздействия на окружающую среду [1–6].

Можно предположить, что ДВС еще в течение предстоящих 50 лет будут оставаться одним из основных источников энергии на транспорте и в связи с этим проблема улучшения их экологических свойств остается актуальной.

На кафедре «Тепловые двигатели» БГТУ проводятся исследования, направленные на получение информации о химическом составе отработавших газов (ОГ) дизельных двигателей и влиянии на состав ОГ различных факторов (термодинамических характеристик рабочего процесса, процесса топливоподачи, смесеобразования, режима работы). Основной акцент



делается на исследовании концентрации в ОГ окислов азота и поиске путей ее снижения.

Ниже приводятся результаты анализа химического состава ОГ четырехтактного дизельного двигателя универсального назначения KM-170FA (производитель — фирма «WUXI KIPOR POWER CO., LTD», Китайская народная республика).

Основные технические характеристики двигателя

Эффективная мощность (номинальная) P_e , кВт	2,5
Частота вращения (номинальная) n , об/мин	3000
Число цилиндров i ,	1
Диаметр цилиндра D , мм	70
Ход поршня S , мм	55
Рабочий объем цилиндра V_h , л	0,212
Геометрическая степень сжатия ϵ	20
Удельный эффективный расход топлива b_e , г/(кВт·ч)	280



Рис. 1. Дизельный двигатель KM-170FA

Внешний вид исследуемого двигателя приведен на рис. 1.

Исследования проводились на лабораторном стенде (рис. 2) с использованием многокомпонентного газоанализатора «Автотест-02.03» (0 кл. точности по ГОСТ Р 52033–2003) (рис. 3), предназначенного для определения содержания в ОГ оксида углерода (CO), диоксида углерода (CO₂), углеводородов (CH), кислорода (O₂), оксидов азота (NO_x), а также коэффициента избытка воздуха (λ-параметра).

В применяемом типе газоанализатора определение концентрации CH, CO₂, CO основано на измерении величины поглощения инфракрасного излучения источника молекулами газов в узких областях спектра (3,4; 4,25 и 4,7 мкм соответственно). Концентрация кислорода O₂ определяется электрохимическим методом, концентрация окислов азота — на основе применения электрохимической ячейки 3NF/F Nitric Oxide CiTicel.

При проведении испытаний ставилась задача получить данные о концентрации химических компонентов в ОГ в широком диапазоне изменения нагрузочных и скоростных режимов рабо-

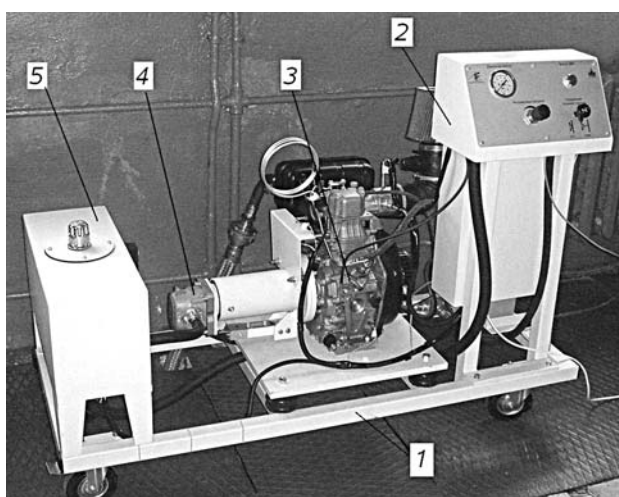


Рис. 2. Автоматизированный лабораторный стенд испытаний двигателя KM-170FA:

1 — фундаментная рама; 2 — панель управления стендом; 3 — двигатель; 4 — нагрузочное устройство гидравлического типа (масляный насос); 5 — масляный бак



Рис. 3. Внешний вид газоанализатора «Автотест-02.03»

ты двигателя ($n = n_{\min \text{xx}} \rightarrow n_{\max}$; $M_e = M_{e \text{xx}} \rightarrow M_{e \max}$). Диапазон изменения параметров исследуемой режимной области задан следующим: $n_{\min \text{xx}} = 1500$; $n_{\max} = 3500$ об/мин; $M_{e \text{xx}} = 0$ Нм; $M_{e \max} = 8$ Нм. Испытания проводились по плану эксперимента, который включал в себя 20 режимов, равномерно покрывающих область эксплуатационных режимов двигателя (рис. 4). Цель проведения испытаний — оптимальное размещение эксплуатационной характеристики приводного агрегата в поле возможных режимов работы дизеля.

На первом этапе исследований после получения данных о значениях концентрации химических компонентов в ОГ выполнялся корреляционный анализ данных. На рис. 5 приведена матрица коэффициентов корреляции, которая отражает наличие линейных зависимостей измеренных концентраций компонентов ОГ и режимных факторов (частоты вращения и крутящего момента). Также на основе приведенных в таблице данных можно оценить взаимную корреляцию между концентрациями компонентов ОГ.

Очевидно, что закономерности протекания процесса сгорания в цилиндре дают выраженную корреляцию между содержаниями кислорода и углекислого газа и нагрузкой дизеля ($r_{O_2-M_e} = -0,921$, $r_{CO_2-M_e} = +0,875$) и, соответственно, также наблюдается взаимосвязь между компонентами O₂ и CO₂ ($r_{O_2-CO_2} = -0,955$). Матрица коэффициентов корреляции показывает, что с возрастанием нагрузки наблюдается увеличение концентрации токсичных компонентов CO, CH, NO_x ($r = +0,60 \dots +0,72$), влияние же частоты вращения на

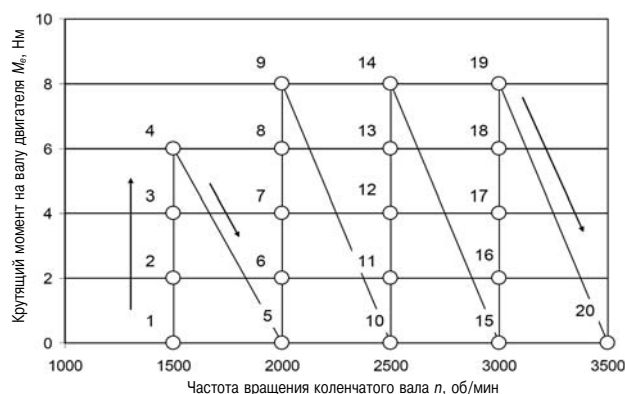


Рис. 4. План эксперимента

	<i>n</i>	<i>Me</i>	<i>n</i> ²	<i>Me</i> ²	<i>n</i> · <i>Me</i>	CO	CH	NO _x	CO ₂	O ₂
<i>n</i>	1,000									
<i>Me</i>	0,005	1,000								
<i>n</i> ²	0,992	-0,038	1,000							
<i>Me</i> ²	0,026	0,965	-0,019	1,000						
<i>n</i> · <i>Me</i>	0,260	0,950	0,214	0,928	1,000					
CO	-0,104	0,594	-0,106	0,648	0,546	1,000				
CH	-0,028	0,673	-0,038	0,750	0,627	0,830	1,000			
NO _x	-0,246	0,721	-0,241	0,643	0,584	0,349	0,417	1,000		
CO ₂	0,195	0,875	0,164	0,917	0,888	0,697	0,854	0,635	1,000	
O ₂	-0,080	-0,921	-0,058	-0,920	-0,881	-0,693	-0,809	-0,758	-0,955	1,000

Рис. 5. Матрица коэффициентов корреляции параметров

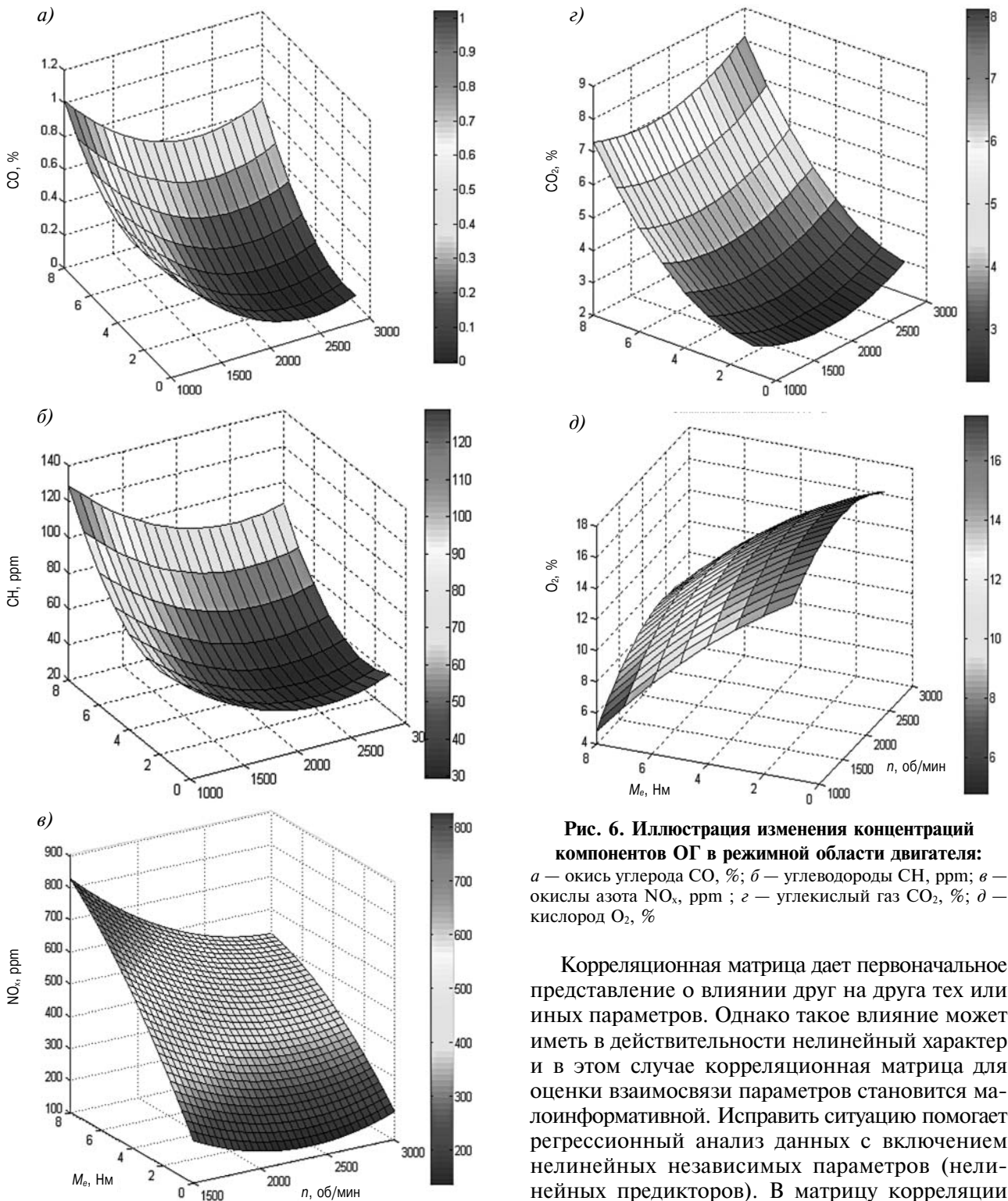


Рис. 6. Иллюстрация изменения концентраций компонентов ОГ в режимной области двигателя:
 а — окись углерода CO, %; б — углеводороды CH, ppm; в — окислы азота NO_x, ppm; г — углекислый газ CO₂, %; д — кислород O₂, %

уровни концентрации рассматриваемых компонентов значительно слабее ($r = -0,10 \dots -0,25$; следует обратить внимание на то, что коэффициенты отрицательны). Изменение частоты вращения также менее существенно влияет на концентрацию O₂ и CO₂.

Следует отметить взаимосвязь концентраций таких компонентов, как CO и CH (наблюдается положительная корреляция: $r_{CO-CH} = +0,830$).

Корреляционная матрица дает первоначальное представление о влиянии друг на друга тех или иных параметров. Однако такое влияние может иметь в действительности нелинейный характер и в этом случае корреляционная матрица для оценки взаимосвязи параметров становится малоинформативной. Исправить ситуацию помогает регрессионный анализ данных с включением нелинейных независимых параметров (нелинейных предикторов). В матрицу корреляции (рис. 5) такие параметры включены: n^2 , M_e^2 , $M_e \cdot n$.

При выполнении регрессионного анализа для описания изменения концентрации компонентов ОГ в режимной области работы двигателя была выбрана так называемая «полная квадратика». Такое описание имеет следующий вид:

Конц = $a + b \cdot n + c \cdot M_e + d \cdot n^2 + e \cdot M_e^2 + f \cdot n \cdot M_e$,
 где a, b, c, d, e, f — коэффициенты уравнения регрессии.

Коэффициенты уравнений регрессии, описывающих уровни концентраций компонентов ОГ дизеля

Коэфф. регрессии	CO, %	CH, ppm	NO _x , ppm	CO ₂ , %	O ₂ , %
<i>a</i>	1,7342E+00	1,4278E+02	8,4785E+02	4,9294E+00	1,0435E+01
<i>b</i>	-1,2996E-03	-8,7451E-02	-6,0086E-01	-2,7795E-03	7,5013E-03
<i>c</i>	-9,5321E-02	-6,3114E+00	1,3373E+02	-1,8418E-01	-1,0071E+00
<i>d</i>	2,5033E-07	1,8517E-05	1,2684E-04	7,0159E-07	-1,8023E-06
<i>e</i>	1,5271E-02	1,7658E+00	-3,3370E+00	8,6574E-02	-7,3795E-02
<i>f</i>	1,4873E-05	-9,2257E-04	-2,1836E-02	4,8034E-05	1,7960E-04

Результаты регрессионного анализа представлены в таблице.

Примечание. При необходимости получения уравнения регрессии вида

Конц = $a + b \cdot n + c \cdot p_e + d \cdot n^2 + e \cdot p_e^2 + f \cdot n \cdot p_e$,
(где p_e — среднее эффективное давление цикла, МПа) следует пересчитать приведенные в таблице коэффициенты, воспользовавшись очевидным соотношением

$$M_e = p_e \left(\frac{V_h}{4\pi} \cdot 10^6 \right),$$

где V_h — рабочий объем цилиндра, м³.

С использованием приведенных в таблице данных в среде программирования MATLAB были построены графики функций Конц = $f(n, M_e)$, которые дают наглядное представление о том, как изменяются концентрации компонентов ОГ в режимной области двигателя (рис. 6).

Анализ характера изменения концентрации компонентов ОГ в режимной области показывает следующее:

➤ Концентрация CO изменяется в пределах 0,05–1,12 %, что свидетельствует о недостаточно полном сгорании топлива на режимах работы с высокой нагрузкой. На режиме номинальной эксплуатационной мощности $C_{CO} = 0,66$ %. Наибольшая концентрация $C_{CO} = 1,12$ % наблюдается при большой нагрузке и минимальных оборотах двигателя.

➤ Изменение концентрации СН имеет приблизительно такой же характер изменения, как и CO. Концентрация СН в зависимости от режима колеблется в пределах $C_{CH} = 14$ –140 ppm. Наибольший уровень концентрации компонента

СН наблюдается на режиме при $n = n_{\min}$ и $M_e = M_{e \max}$.

➤ Концентрация NO_x изменяется в пределах 250–830 ppm, что характерно для малоразмерных высокооборотных двигателей. Наибольшая концентрация $C_{NO_x} = 830$ ppm наблюдается при большой нагрузке и минимальных оборотах двигателя. На режиме номинальной эксплуатационной мощности $C_{NO_x} = 550$ ppm.

➤ Концентрация углекислого газа CO₂ изменяется в зависимости от режима в пределах 0,7–9,5 %. Характер изменения концентрации данного компонента вполне очевиден.

➤ Концентрация кислорода O₂ изменяется в зависимости от режима в пределах 5,8–20,1 %. Характер изменения концентрации данного компонента также вполне очевиден.

➤ С учетом полученных результатов изменения концентрации вредных веществ, двигатель типа КМ-170FA целесообразно использовать для привода агрегата с постоянной частотой вращения, например электрогенератора.

Литература

1. Звонов В.А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания. 2-е изд., перераб. М. : Машиностроение, 1981. 160 с.
2. Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И. Токсичность отработавших газов дизелей. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 376 с.
3. Горбунов В.В., Патрахальцев Н.Н. Токсичность двигателей внутреннего сгорания. М. : Изд-во РУДН, 1998. 214 с.
4. Новиков Л.А. Анализ потенциала модернизации дизелей семейства ЧН21/21 для достижения действующих норм вредных выбросов // Двигателестроение. 2011. № 4. С. 31–38.
5. Гумеров И.Ф., Хафизов Р.Х., Борисенков Е.Р., Гатауллин Н.А., Румянцев В.В. Повышение экологических показателей качества автомобильных дизелей КамАЗ — основное направление их развития // Двигателестроение. 2013. № 1. С. 31–37.
6. Новиков Л.А. Основные направления создания малотоксичных транспортных двигателей // Двигателестроение. 2002. № 2. С. 23–27.