

СНИЖЕНИЕ ДЫМНОСТИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДИЗЕЛЯ ОТКЛЮЧЕНИЕМ ЧАСТИ ЦИЛИНДРОВ

В.И. Суркин, А.А. Петелин, С.Ю. Федосеев

DECREASING SMOKE OF THE EXHAUST GASES OF DIESEL ENGINE THROUGH THE PROCESS CYLINDERS CUTOUT

V.I. Surkin, A.A. Petelin, S.U. Fedoseev

Проведены расчетные и экспериментальные исследования по снижению дымности отработавших газов дизеля отключением части цилиндров.

Ключевые слова: дымность, дизель, отработавшие газы, отключение части цилиндров.

The article is concerned with the problem of design and experimental analysis on decreasing smoke of the burnt gases of diesel engine through the process cylinders cutout.

Keywords: smoke, diesel engine, burnt gases, cylinders cutout.

Введение. Проводимая в стране программа широкой дизелизации подвижного состава ставит более остро вопросы защиты атмосферы от загрязнения токсичными ингредиентами отработавших газов дизелей.

При сгорании 1 кг дизельного топлива выделяется около 80–100 г токсичных компонентов (20–30 г окиси углерода, 20–40 г окислов азота, 4–10 г углеводородов, 10–30 г окислов серы, 0,8–1,0 г альдегидов, 3–5 г сажи и др.).

Как известно, особую группу токсичных компонентов отработавших газов дизельных двигателей составляют полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), в том числе и наиболее активный из них бенз(а)пирен ($C_{20}H_{12}$), являющийся индикатором присутствия канцерогенов в отработавших газах. Значительное количество тяжелых, канцерогенных ароматических углеводородов адсорбируется на саже. Известно, что концентрация бенз(а)пирена в дисперсных частицах, т. е. на сажевых частицах, в 3–4 раза выше, чем в потоке газа.

При работе дизельного двигателя в атмосферу выбрасывается в среднем около 3–5 кг сажи на 1 т сгоревшего топлива. При этом в зависимости от режима работы двигателя на долю сажи приходится от 30 до 90 % токсичного воздействия, обусловленного наличием в ней бенз(а)пирена [1].

Особенности нормативных документов. В настоящее время разрабатываются и успешно претворяются в жизнь мероприятия по снижению загрязнения атмосферы выбросами автотракторных двигателей, включающие в себя:

– внедрение государственных и отраслевых стандартов, регламентирующих допустимые уровни выбросов вредных веществ автотракторными двигателями (см. таблицу);

– изыскание новых видов топлив и присадок к ним, позволяющих заменить жидкие топлива нефтяного происхождения, повысить топливную экономичность двигателей и значительно снизить их токсичность;

– разработку и производство антитоксичных устройств, способствующих снижению токсичности существующих типов двигателей, создание двигателей с малотоксичным рабочим процессом (рис. 1);

– серийный выпуск средств контроля токсичности и дымности отработавших газов.

В таблице представлены максимально допустимые значения выбросов сажи, действующие в странах Европы, при использовании систем, имеющихся на сегодняшний день. Как известно, показатели токсичности отечественных двигателей не соответствуют этим нормам.

Расчет и конструирование

Нормы содержания токсичных составляющих в отработавших газах дизельных двигателей

Нормы	Дата введения	PM, г/кВт·ч	Дымность K, м ⁻¹
EURO 3	Октябрь 2000 г.	0,10/ 0,13*	0,8
EURO 4	Октябрь 2005 г.	0,02	0,5
EURO 5	Октябрь 2008 г.	0,02	0,5

* Для двигателей рабочим объемом менее 0,75 дм³ на цилиндр и с номинальной частотой вращения более 3000 мин⁻¹.

В большинстве стран мира, в том числе и в РФ, в качестве единственного регламентируемого токсичного компонента отработавших газов дизельного двигателя нормируется дымность отработавших газов как показатель интенсивности сажевых выбросов дизеля.

В соответствии с ГОСТ 17.2.2.02-98 «Охрана природы. Атмосфера. Нормы и методы определения дымности отработавших газов тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин» под дымностью понимают показатель, характеризующий степень поглощения светового потока, просвечивающего имеющий определенную длину столб отработавших газов.

K – показатель ослабления светового потока по основной шкале, м⁻¹. Технический норматив дымности отработавших газов, измеренной оптическим методом, равный величине, обратной толщине слоя отработавших газов, проходя через который световой поток от источника света дымомера ослабляется в e раз, где e – основание натурального логарифма [2].

На рис. 1 представлены основные способы снижения вредных выбросов в отработавших газах двигателей.

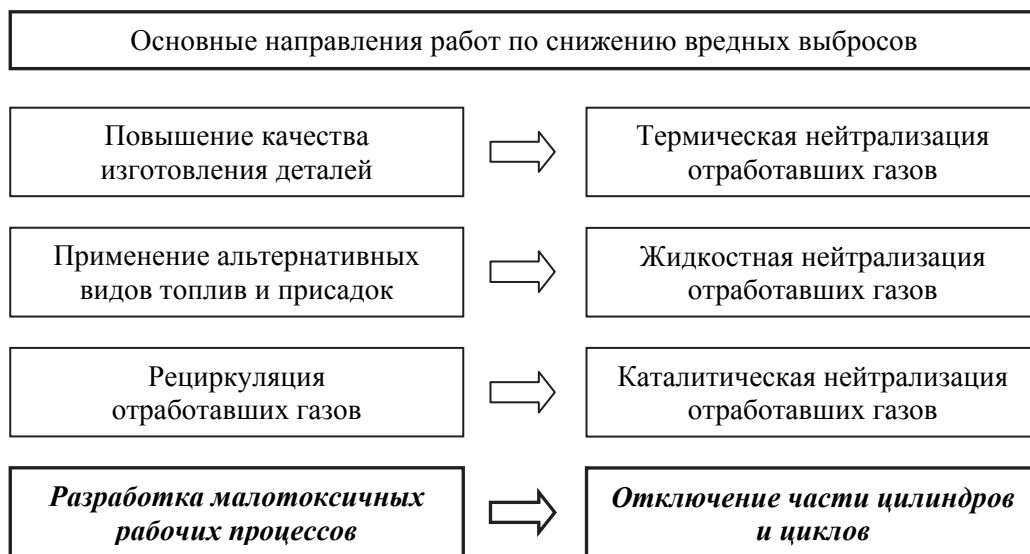


Рис. 1. Схема существующих способов снижения токсичности отработавших газов двигателя

Установлено, что отключение части цилиндров двигателя приводит к снижению расхода топлива, при этом предположительно снижается и дымность отработавших газов. Для подтверждения ниже представлены результаты исследований дизеля Д-240.

Методика и алгоритм расчета дымности отработавших газов. На рис. 2 приведена блок-схема расчетной модели по определению дымности отработавших газов дизеля.

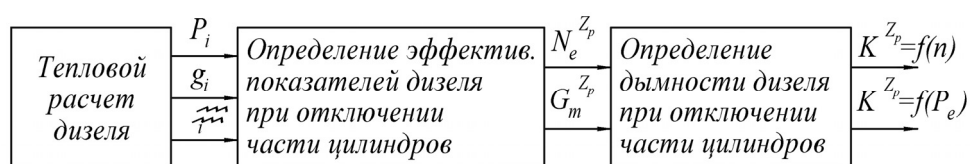


Рис. 2. Блок-схема расчетной модели по определению дымности отработавших газов дизеля

Вначале проводится тепловой расчет дизеля для определения индикаторных показателей (P_i, g_i, η_i). Затем проводится расчет механических потерь при отключении части цилиндров и эффективных показателей двигателя.

Эффективную мощность двигателя в зависимости от количества работающих цилиндров можно рассчитать по полученной нами формуле [3]:

$$N_e^{Z_p} = \frac{N_e^H}{i \cdot \eta_M^H} \cdot \left[\frac{z_p}{i} - \frac{z_b}{i} \cdot \delta_{мп} \cdot \left(\frac{1}{\eta_M^H} - 1 \right) \right], \text{ кВт}, \quad (1)$$

где N_e^H – номинальная эффективная мощность двигателя, кВт; η_M^H – эффективный КПД при номинальной мощности; i – количество цилиндров в двигателе; z_p – количество работающих цилиндров; z_b – количество выключенных цилиндров; $\delta_{мп}$ – снижение механических потерь: $\delta_{мп} = 1 - (\delta_{тн} + \delta_{нх} + \delta_{грм})$, $\delta_{тн}$ – доля механических потерь на привод топливного насоса ($\delta_{тн} = 0,02$), $\delta_{нх}$ – доля механических потерь на насосные ходы ($\delta_{нх} = 0,14$), $\delta_{грм}$ – доля механических потерь на привод газораспределительного механизма ($\delta_{грм} = 0,062$).

Часовой расход топлива в зависимости от количества работающих цилиндров рассчитывался по формуле

$$G_T^{Z_p} = G_{тн} \cdot \frac{k_N}{k_\eta}, \text{ кг/ч}, \quad (2)$$

где $G_{тн}$ – часовой расход топлива при номинальной мощности, кг/ч; k_N – коэффициент изменения номинальной мощности двигателя при отключении части цилиндров

$$k_N = \frac{z_p}{i} - \frac{z_b}{i} \cdot \delta_{мп} \cdot \left(\frac{1}{\eta_M^H} - 1 \right); \quad (3)$$

k_η – коэффициент изменения механического КПД двигателя при отключении части цилиндров

$$k_\eta = \frac{1 + \eta_M^H (k_N - 1)}{k_M + \eta_M^H \cdot (k_N - k_M)}; \quad (4)$$

k_M – коэффициент изменения мощности механических потерь двигателя при отключении части цилиндров

$$k_M = \frac{z_p}{i} - \frac{z_b}{i} \cdot \delta_{мп}. \quad (5)$$

Коэффициент избытка воздуха – отношение действительного количества воздуха к теоретически необходимому для полного сгорания топлива:

$$\alpha^{Z_p} = \frac{G_B^{Z_p}}{L_0 \cdot G_T^{Z_p}}, \quad (6)$$

где $G_B^{Z_p}$ – действительный расход воздуха, кг/ч; L_0 – теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива, $L_0 = 14,7$ кг воздуха/кг топлива.

Сажесодержание в отработавших газах, определялось по уточненной нами формуле [4]:

$$D = a \cdot e^{-b \cdot \alpha} = 27,438 \cdot e^{-0,7818 \cdot \alpha}, \text{ г/м}^3,$$

где a, b – постоянные для данного двигателя.

Результаты расчетного исследования.

Результаты расчета представлены на рис. 3.

Как видно из рис. 3, с увеличением частоты вращения коленчатого вала дымность возрастает за счет повышения коэффициента избытка воздуха. При отключении половины

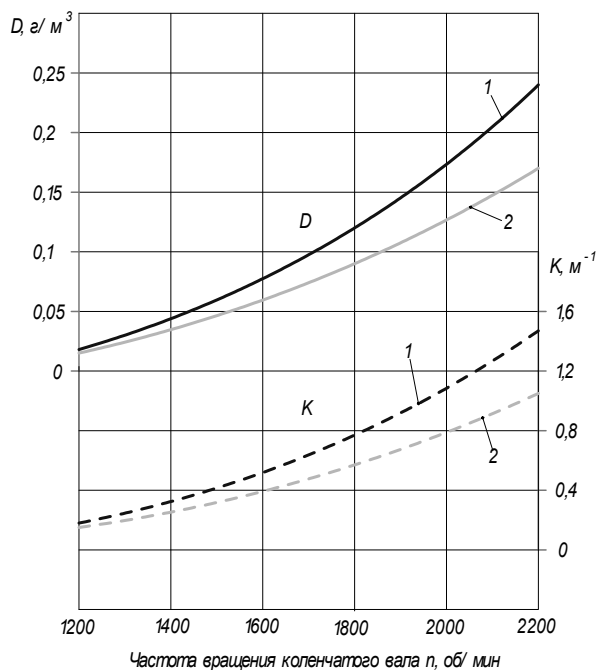


Рис. 3. Результаты расчета дымности отработавших газов: 1 – исходный двигатель; 2 – отключена подача топлива

Расчет и конструирование

цилиндров (отключена только подача топлива) дымность снижается на номинальной частоте вращения коленчатого вала двигателя ($n = 2200$ об/мин) на 28 %.

Методика экспериментального исследования. Для проверки предложенной модели были проведены экспериментальные исследования дизеля Д-240. Исследования показали, что наиболее целесообразно использовать способ отключения части цилиндров для повышения экономичности и снижения дымности двигателя на холостом ходу и малых нагрузках до коэффициента загрузки двигателя 0,2 от номинального.

В настоящей статье приведены результаты стендовых испытаний двигателя Д-240 при отключении части цилиндров. Испытания двигателя проведены в лаборатории кафедры «Тракторы и автомобили» ЧГАА на стенде КИ-5543 в соответствии с ГОСТ 185090-88. Параметры работы двигателя определяли при трех вариантах испытаний:

- 1) испытания исходного двигателя;
- 2) испытания с отключением только подачи топлива в цилиндры двигателя;
- 3) испытания с отключением подачи топлива и привода клапанов цилиндров двигателя (клапаны были постоянно закрыты).

Измерения дымности проводились в соответствии с ГОСТ 17.2.2.02-98 на режиме установившихся частот вращения коленчатого вала двигателя. Прибор для измерения дымности ДО-1 состоит из измерителя дыма и оптического детектора, детектор устанавливался в выхлопную систему стенда.

Принцип работы дымомера основан на методе просвечивания отработавших газов двигателя.

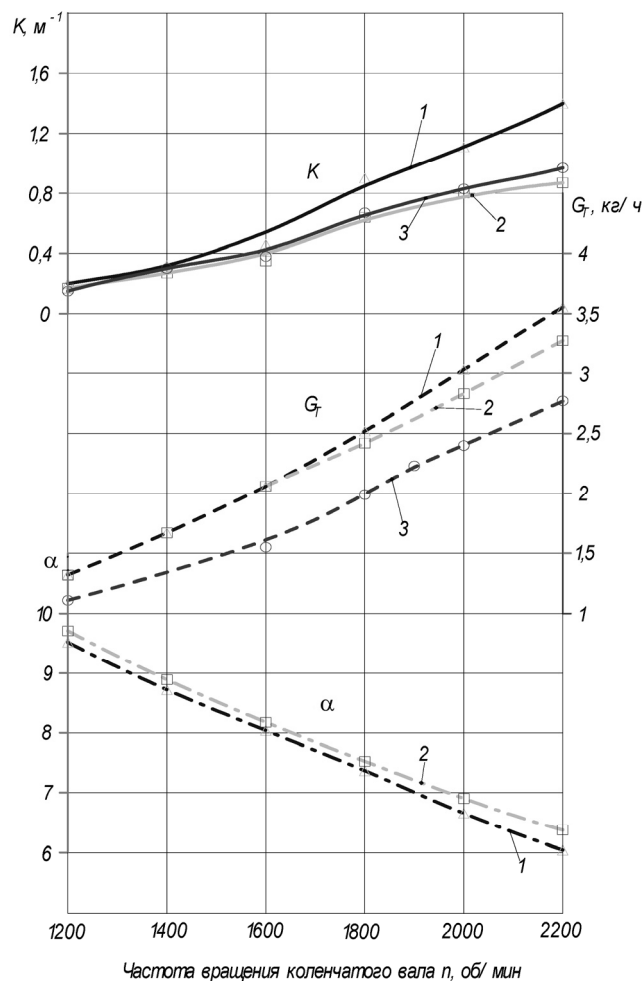


Рис. 4. Изменение часового расхода топлива, коэффициента избытка воздуха и дымности дизеля в зависимости от частоты вращения коленчатого вала: 1 – исходный двигатель; 2 – отключена подача топлива 2 и 3 цилиндров; 3 – отключено топливо и ГРМ 2, 3 цилиндров

Результаты экспериментального исследования. Часовой расход топлива (рис. 4) с отключением только подачи топлива по сравнению с исходным двигателем снижается незначительно, так как при этом индикаторный КПД изменяется в небольших пределах [5, 6].

Полное отключение цилиндров (вариант 3) на различной частоте вращения коленчатого вала приводит к снижению часового расхода топлива в среднем на 25 %. Это объясняется главным образом тем, что уменьшаются потери на привод газораспределительного механизма 2 и 3 цилиндров, а также снижаются насосные потери. Кроме того, улучшается процесс сгорания, так как при отключении подачи топлива и привода клапанов 2 и 3 цилиндров, когда оставшиеся работающие цилиндры вынуждены совершать большую работу, цикловые подачи топлива в этих цилиндрах возрастают. Это приводит к улучшению распыливания топлива, распределения его по объему камеры сгорания, уменьшению неравномерности подачи топлива по секциям топливного насоса высокого давления и снижению нестабильности подачи топлива в последовательности циклов, что благоприятно сказывается на индикаторном КПД.

Выделение токсичных компонентов (рис. 4) в отработавших газах зависит от коэффициента избытка воздуха. При отключении только топлива по сравнению

с исходным двигателем дымность отработавших газов на различных скоростных режимах уменьшается от $0,05$ до $0,55 \text{ м}^{-1}$ главным образом за счет увеличения коэффициента избытка воздуха. По варианту 3 величина дымности незначительно возрастает, что связано с отсутствием добавки воздуха в отработавшие газы из-за закрытия клапанов 2 и 3 цилиндров. У варианта 3 по сравнению с вариантом 1 показатели ослабления светового потока снижаются, что вызвано уменьшением расхода топлива, улучшением полноты его сгорания в 1 и 4 цилиндрах, уменьшением неравномерности цикловой подачи топлива по цилиндрам двигателя.

На рис. 5 представлен сравнительный анализ экспериментальных исследований с результатами расчета дымности дизеля при отключении части цилиндров.

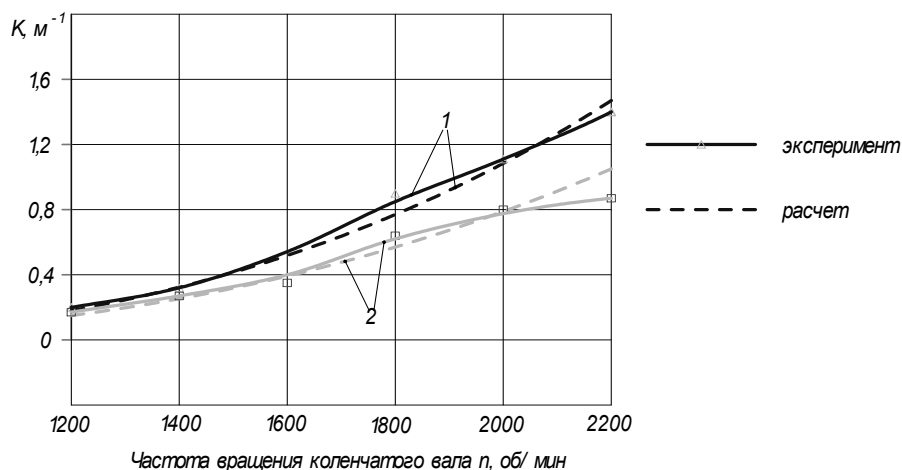


Рис. 5. Сравнение результатов экспериментальных исследований с расчетом дымности отработавших газов: 1 – исходный двигатель; 2 – отключена подача топлива

Как видно из рис. 5, расхождение между результатами расчета дымности дизеля и экспериментальными исследованиями не превышает в среднем 15 %.

Выводы

1. Предложенная расчетная модель определения дымности при отключении части цилиндров дизеля удовлетворительно совпадает с результатами экспериментов. Максимальное расхождение результатов расчета и экспериментов на номинальной частоте вращения коленчатого вала двигателя ($n = 2200$ об/мин) не превышает 15 %.

2. Наряду с улучшением экономических показателей дизеля при отключении цилиндров, заметно снижается и его дымность, так например, при отключении 2, 3 цилиндров на номинальной частоте вращения коленчатого вала ($n = 2200$ об/мин) часовой расход топлива снижается на 25 %, дымность при тех же условиях – на 30 %.

3. По данным результатов исследования видно, что для снижения дымности, достаточно отключать только подачу топлива в часть цилиндров двигателя, дымность при этом снижается с $1,4$ до $0,87 \text{ м}^{-1}$, т. е. на 35 %.

Литература

1. Говоруценко, Н.Я. Экономия топлива и снижение токсичности на автомобильном транспорте / Н.Я. Говоруценко. – М.: Транспорт, 1990. – 135 с.
2. ГОСТ 17.2.2.02-98 Охрана природы. Атмосфера. Нормы и методы определения дымности отработавших газов тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин.
3. Федосеев, С.Ю. Анализ расхода топлива дизеля Д-240 при отключении части цилиндров / С.Ю. Федосеев, А.А. Петелин, В.И. Суркин // Аграрная наука – основа успешного развития АПК и сохранения экосистем: материалы междунар. науч.-техн. конф. – Волгоград: ВГАУ, 2012. – Т. 2. – С. 254–258.
4. Бунова, Е.В. Снижение сажевого содержания в отработавших газах тракторного дизеля за счет улучшения условий смесеобразования и сгорания: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Е.В. Бунова. – Челябинск, 1996. – 18 с.

Расчет и конструирование

5. Петелин, А.А. Анализ нагрузочных характеристик дизеля Д-240 при отключении части цилиндров / А.А. Петелин, С.Ю. Федосеев // Вестник ЧГАА. – Челябинск: ЧГАА, 2011. – Т. 58. – С. 148–151.

6. Анализ характеристик холостого хода дизеля Д-240 при отключении части цилиндров / С.Ю. Федосеев, А.А. Петелин, А.Ф. Малышев и др. // Вестник ЧГАА. – Челябинск: ЧГАА, 2011. – Т. 58. – С. 166–169.

Поступила в редакцию 15 февраля 2012 г.

Суркин Вячеслав Иванович. Доктор технических наук, профессор, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, заведующий кафедрой «Тракторы и автомобили», Челябинская государственная агроинженерная академия. Область интересов – повышение технического уровня ДВС, исследования рабочего процесса ДВС. E-mail: kat@csaa.ru

Vyacheslav I. Surkin. The doctor of engineering science, professor, the Honored Worker of High School of Russian Federation, the head of «Tractors and automobiles» department, Chelyabinsk State Agriculture Engineering Academy. The area of scientific interests – improvement of technical level of internal combustion engine, analysis of working process of internal combustion engine. E-mail: kat@csaa.ru

Петелин Андрей Александрович. Магистрант кафедры «Тракторы и автомобили», Челябинская государственная агроинженерная академия. Область интересов – повышение технического уровня ДВС, исследования рабочего процесса ДВС. E-mail: petelin_aa@mail.ru

Andrey A. Petelin. Master of the «Tractors and automobiles» department, Chelyabinsk State Agriculture Engineering Academy. The area of scientific interests – improvement of technical level of internal combustion engine, analysis of working process of internal combustion engine. E-mail: petelin_aa@mail.ru

Федосеев Семен Юрьевич. Аспирант кафедры «Тракторы и автомобили», Челябинская государственная агроинженерная академия. Область интересов – повышение технического уровня ДВС, исследования рабочего процесса ДВС. E-mail: lsemeon@mail.ru

Semeon U. Fedoseev. Postgraduate student of the «Tractors and automobiles» department, Chelyabinsk State Agriculture Engineering Academy. The area of scientific interests – improvement of technical level of internal combustion engine, analysis of working process of internal combustion engine. E-mail: lsemeon@mail.ru