**УДК 621.436**

**MРНТИ 55.42.29**

**А. А. Кусаинов[[1]](#footnote-1)\***

1Торайгыров университет, Казахстан

\*(e-mail: [akram.kusainov@mail.ru](mailto:akram.kusainov@mail.ru))

**Снижение дымности отработавших газов дизеля отключением части цилиндров**

**Аннотация**

*Основная проблема:* Ведущими направлениями конструктивного и технологического совершенствования автотракторных средств являются снижение расхода топлива и токсичности отработавших газов. Одним из наиболее эффективных мероприятий по снижению расхода топлива и воздействия на экологию является использование комплексного метода полного и частичного отключения части цилиндров при эксплуатации ДВС на холостом ходу и малых нагрузках. Данный метод в ограниченном масштабе применяется на современных транспортных средствах. Однако сложность разработки и применения технических средств для его реализации состоит в отличительных особенностях режимов работы автотракторных средств, специфики условий эксплуатации. В приведенных исследованиях индивидуальная разработка мероприятий отключения топливоподачи и привода ГРМ применены к двигателю Д-240 трактора МТЗ-80. Для проведения экспериментальных исследований использовались обкаточно-тормозной стенд КИ-5543 с измерительными приборами, дизельный двигатель Д-240 трактора МТЗ-80, дымомер «Инфракар Д1» и газоанализатор «Infralight 11P». При экспериментальной работе были выбраны три характерных режима работы двигателя Д-240 без нагрузки и под нагрузкой Ne = 0…35 кВт: 1) типовой режим работы всех 4 цилиндров; 2) искусственный режим работы, формируемый посредством отключения подачи топлива в 2 цилиндрах 4-цилиндрового двигателя; 3) искусственный режим работы, формируемый посредством отключения подачи топлива в 2 цилиндрах и газораспределительного механизма в 2 цилиндрах 4-цилиндрового двигателя. Установлено, что отключение части цилиндров дизельного двигателя приводит к снижению расхода топлива в среднем на 25–27 %, сажесодержания и дымности отработавших газов на 30–35 %, в зависимости от режима работы двигателя.

*Цель:* Провести расчетные и экспериментальные исследования по снижению дымности отработавших газов дизеля отключением части цилиндров.

*Методы:* Методы расчетных и экспериментальных исследовании.

*Результаты и их значимость:* Проведены расчетные и экспериментальные исследования по снижению дымности отработавших газов дизеля отключением части цилиндров. Приведены зависимости часового расхода топлива, расхода воздуха, коэффициента избытка воздуха, сажесодержания и дымности отработавших газов четырехцилиндрового дизельного двигателя при отключении части его цилиндров на различных режимах нагружения.

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

**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 (С20Н12), 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 (таблица 1);

– 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 (Рисунок 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.

Таблица 1 – Нормы содержания токсичных составляющих в отработавших газах дизельных двигателей

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Нормы | Дата введения | PM, г/кВт·ч | Дымность К, 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 РК, 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 рисунке 1 представлены основные способы снижения вредных выбросов в отработавших газах двигателей.



Рисунок 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.

**Материалы и методы**

Методика и алгоритм расчета дымности отработавших газов. На рисунке 2 приведена блоксхема расчетной модели по определению дымности отработавших газов дизеля.



Рисунок 2 – Блок-схема расчетной модели по определению дымности отработавших газов дизеля

Вначале проводится тепловой расчет дизеля для определения индикаторных показателей (Pi, gi, ηi). 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]:

кВт, (1)

где – номинальная эффективная мощность двигателя, кВт;  – эффективный КПД при номинальной мощности; i – количество цилиндров в двигателе;  – количество работающих цилиндров; – количество выключенных цилиндров;  – снижение механических потерь:  ,  – доля механических потерь на привод топливного насоса ( = 0,02),  – доля механических потерь на насосные ходы (= 0,14),  – доля механических потерь на привод газораспределительного механизма ( = 0,062).

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

кг/ч, (2)

где Gтн – часовой расход топлива при номинальной мощности, кг/ч; kN – коэффициент изменения номинальной мощности двигателя при отключении части цилиндров

 (3)

kη – коэффициент изменения механического КПД двигателя при отключении части цилиндров

 (4)

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

 (5)

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

 (6)

где – действительный расход воздуха, кг/ч; L0 – теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива, L0 = 14,7 кг воздуха/кг топлива. Сажесодержание в отработавших газах, определялось по уточненной нами формуле [4]:

г/м3 ,

где a, b – постоянные для данного двигателя.

**Результаты**

Результаты расчетного исследования. Результаты расчета представлены на рисунке 3.

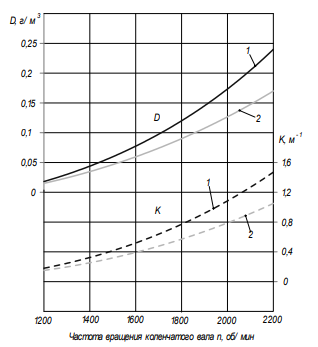


Рисунок 3 – Результаты расчета дымности отработавших газов: 1 – исходный двигатель; 2 – отключена подача топлива

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

Результаты экспериментального исследования. Часовой расход топлива (рисунок 4) с отключением только подачи топлива по сравнению с исходным двигателем снижается незначительно, так как при этом индикаторный КПД изменяется в небольших пределах [1].

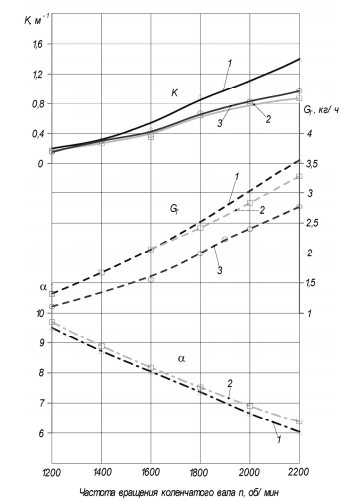


Рисунок 4 – Изменение часового расхода топлива, коэффициента избытка воздуха и дымности дизеля в зависимости от частоты вращения коленчатого вала: 1 – исходный двигатель; 2 – отключена подача топлива 2 и 3 цилиндров; 3 – отключено топливо и ГРМ 2, 3 цилиндров

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 подач топлива в последовательности циклов, что благоприятно сказывается на индикаторном КПД.

Выделение токсичных компонентов (рисунок 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 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 рисунке 5 представлен сравнительный анализ экспериментальных исследований с результатами расчета дымности дизеля при отключении части цилиндров.

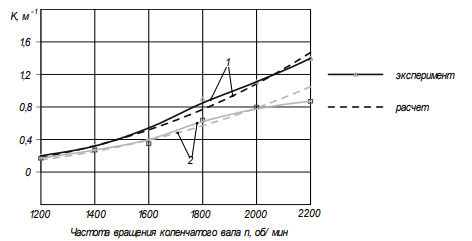


Рисунок 5 – Сравнение результатов экспериментальных исследований с расчетом дымности отработавших газов: 1 – исходный двигатель; 2 – отключена подача топлива

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

**Обсуждение**

В практике эксплуатации автотракторной техники известны проблемы выполнения достаточно широкого перечня выполняемых работ и требуемых режимов эксплуатации. Работы, направленные на рациональный выбор грузоподъемности автомобилей, тягового класса тракторов не приводят к желаемой эффективной загрузке двигателя. В результате при работе на холостом ходу и малых нагрузках не обеспечивается заданная экономичность. Кроме того, показатели токсичности превышают допустимый порог на 10–30 %. Необходимы мероприятия по снижению токсичности и повышению топливной экономичности двигателей с низкими нормами Евро. Одним из наиболее эффективных мероприятий является использование комплексного метода полного и частичного отключения части цилиндров при эксплуатации ДВС на холостом ходу и малых нагрузках. Индивидуальная разработка мероприятий отключения топливоподачи и привода ГРМ, конкретно под каждую машину с учетом особенности режимов работы автотракторных средств и специфики их условий является актуальной задачей.

Теоретические и экспериментальные исследования, приведенные в данных материалах, решены для дизельного двигателя трактора Д-240. Однако при уточнении в экспериментальных условиях могут быть распространены на любые дизельные и бензиновые двигатели, а также перспективные новые модели, эксплуатирующиеся при недозагрузках.

**Заключение**

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 м –1, т. е. на 35 %.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1 Суркин, В.И. Снижение дымности отработавших газов дизеля отключением части цилиндров / В.И. Суркин, А.А. Петелин, С.Ю. Федосеев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2012. – Вып. 20. – С. 69–74.

2 Суркин, В.И. Регулирование работы двигателя тракторно-транспортного агрегата отключением части его цилиндров / В.И. Суркин, С.Ю. Федосеев, А.А. Петелин // Известия Самар. гос. с.-х. академии. – 2012. – Вып. 3. – С. 41–45.

3 Влияние отключения некоторых цилиндров двигателя на токсичность отработавших газов / В.Н. Кожанов, Н.А. Баганов, А.А. Петелин, Т.Г. Бехтольд // Новости науки Казахстана. – 2014. – № 1 (119). – С. 104–114

4 Изучение снижения токсичности отработавших газов дизельного двигателя / В.Н. Кожанов, А.А. Петелин, Н.А. Баганов, Т.Г. Бехтольд // Вестник Нац. инженер. академии Республики Казахстан. – 2017. – № 1 (63). – С. 97–104.

**REFERENCE**

1 Surkin V.I., Petelin A.А., Fedoseev S.Y. [Reducing the Opacity of Exhaust Gases of a Diesel Engine by Disabling Part of the Cylinder]. Bulletin of the South Ural state University. Ser. Mechanical Engineering, 2012, vol. 20, pp. 69–74. (in Russ.)

2 Surkin V.I., Petelin A.А., Fedoseev S.Y. [Regulation of the Engine Operation of the TractorTransport Unit by Cutting off Part of Its Cylinders]. Bulletin Samara State Agricultural Academy, 2012, vol. 3, pp. 41–45. (in Russ.)

3 Kozhanov V.N., Baganov N.A., Petelin A.A., Bekhtold T.G. [Effect of Switching off Certain Engine Cylinders on Exhaust Toxicity]. Science news of Kazakhstan, 2014, no. 1 (119), pp. 104–114. (in Russ.)

4 Kozhanov V.N., Petelin A.A., Baganov N.A., Bekhtold T.G. [Study of Reducing the Toxicity of Exhaust Gases of a Diesel Engine]. Bulletin of the National Engineering Academy of the Republic of Kazakhstan, 2017, no. 1 (63), pp. 97–104. (in Russ.)

**А.A. Кусаинов**1

1Торайғыров университеті, Павлодар қ., Қазақстан Республикасы

**Цилиндрлердiң бір бөлігін өшіру арқылы дизельде пайдалынған газдардың түтінін азайту**

Негізгі мәселе: Автомобильді конструктивті және технологиялық жетілдірудің жетекші бағыттары отын шығынын және пайдалынған газдардың құрамындағы улағыш заттарды азайту болып табылады. Жанармай шығынын және қоршаған ортаға әсерді азайтудың ең тиімді шараларының бірі бос және төмен жүктемелерде ІЖҚ жұмысы кезінде кейбір цилиндрлердi толық және ішінара өшірудiң кешенді әдісін қолдану болып табылады. Бұл әдіс қазіргі заманғы көліктерде шектеулі деңгейде қолданылады. Дегенмен, оны жүзеге асыруға арналған техникалық құралдарды әзірлеу мен қолданудың күрделілігі автотракторлы көліктердің жұмыс режимдерінің ерекше белгілерінде, пайдалану жағдайларының ерекшеліктерінде жатыр. Жоғарыда келтірілген зерттеулерде жанармай беруді және хронометраждық жетекті өшіру шараларын жеке әзірлеу МТЗ-80 тракторының Д-240 қозғалтқышына қолданылады. Тәжірибелік зерттеулер үшін өлшеу құралдары бар KИ-5543 тежегіш сынағы стенді, МТЗ-80 тракторының Д-240 дизельдік қозғалтқышы, «Infracar D1» түтін өлшегіші және «Infralight 11P» газ анализаторы пайдаланылды. Тәжірибелік жұмыс кезінде D-240 қозғалтқышының жүктемесіз және жүктеме кезінде Ne = 0 ... 35 кВт жұмысының үш сипаттамалық режимі таңдалды: 1) барлық 4 цилиндрдің типтік жұмысы; 2) 4 цилиндрлі қозғалтқыштың 2 цилиндріндегі отын беруді өшіру арқылы қалыптасатын жасанды жұмыс режимі; 3) 4 цилиндрлі қозғалтқыштың 2 цилиндріндегі отын беруді және 2 цилиндрдегі газ тарату механизмін өшіру арқылы қалыптасатын жасанды жұмыс режимі. Дизельдік қозғалтқыштың цилиндрлерінің бір бөлігін өшіру қозғалтқышқа байланысты отын шығынын орташа есеппен 25–27%, пайдаланылған газдардағы күйе мен түтіннің 30–35% төмендеуіне әкелетіні анықталды.

Мақсаты: Цилиндрлердiң бір бөлігін өшіру арқылы дизельдік пайдалынған газдардың құрамындағы улағыш заттарды азайту мақсатында есептеу және эксперименттік зерттеулер жүргiзу.

Әдістері: Есептеу және эксперименттік зерттеулер әдістері.

Нәтижелері және олардың маңыздылығы: Дизельдік пайдалынған газдардың құрамындағы улағыш заттарды азайту мақсатында цилиндрлердiң бір бөлігін өшіру арқылы есептеу және эксперименттік зерттеулер жүргiзілді. Әртүрлі жүктеме жағдайында цилиндрлердiң бір бөлігін өшірілген төрт цилиндрлі дизельді қозғалтқыштың сағаттық отын шығыны, ауа шығыны, артық ауа коэффициенті, күйе мөлшері және пайдалынған газ түтінінiң тәуелдіктері келтірілген.

Түйін сөздер: түтін, дизель, цилиндрлердiң бір бөлігін өшіру.

**А.А. Kussainov1**

1Toraighirov University, Pavlodar c., Republic of Kazakhstan

**Decreasing smoke of the exhaust gases of diesel engine through the process cylinders cutout**

Main problem: The main lines of constructive and technological improvement of motor vehicles are reducing fuel consumption and exhaust gas toxicity. One of the most effective measures to reduce fuel consumption and impact on the environment is to apply a complex method for full and partial shutdown of some cylinders when the engine operates at idle and low loads. This method limitedly applied for modern vehicles. However, it is complicated to develop and use the technical means for its implementation due to the distinctive features of operating modes of motor vehicles and the specifics of operating conditions. In the reviewed studies, the particularly developed measures for disabling fuel supply and timing drive were applied to the D-240 engine of an MTZ-80 tractor. To carry out the experiments, we used a KI-5543 roller-brake stand with measurement instruments, a D-240 diesel engine of an MTZ-80 tractor, an “Infrakar D1” opacimeter and an “Infralight 11P” gas analyzer. For the experiments, we selected three typical operating modes of a D-240 engine without load and under the load Ne = 0...35 kW: 1. a normal operating mode of all 4 cylinders; 2. an artificial operating mode created by switching off the fuel supply in 2 cylinders of a 4-cylinder engine; 3. an artificial operating mode created by switching off the fuel supply in 2 cylinders and gas distribution mechanism in 2 cylinders of a 4-cylinder engine. It was found that the shutdown of some diesel engine cylinders leads to a reduction in fuel consumption by an average of 25–27 %, in carbon-black content and smoke content of exhaust gases by 30–35 %, depending on the operating mode of the engine.

Purpose: To carry out computational and experimental studies to reduce the opacity of diesel exhaust gases by turning off part of the cylinders.

Methods: Methods of calculation and experimental research.

Results and their significance: Computational and experimental studies have been carried out to reduce the opacity of diesel exhaust gases by turning off part of the cylinders. We determined the dependences of the hourly fuel consumption, air consumption, air excess coefficient, carbon-black content and smoke content of exhaust gases of the four-cylinder diesel engine when switching off some of its cylinders at different loading modes.

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

**Сведения об авторах:**

**Кусаинов** **А.A.** – магистрант, Торайғыров университеті, Павлодар қ., Қазақстан Республикасы. **Кусаинов** **А.А.** – магистрант Торайгыров университета, г. Павлодар, Республика Казахстан. **Kussainov, А.** -master's degree student of Toraighirov University, Pavlodar c., Republic of Kazakhstan. E-mail: [akram.kusainov@mail.ru](mailto:akram.kusainov@mail.ru)

1. [↑](#footnote-ref-1)