

УДК 621.436.001

На правах рукописи

КАМЫШНИКОВ РОМАН ОЛЕГОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ КАЧЕСТВ
АВТОТРАКТОРНЫХ ДИЗЕЛЕЙ
РЕГУЛИРОВАНИЕМ ИХ АКТИВНЫХ РАБОЧИХ ОБЪЁМОВ
НА РЕЖИМАХ МАЛЫХ НАГРУЗОК**

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук
по специальности 05.04.02 - тепловые двигатели

Москва, 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет дружбы народов» в департаменте машиностроения и приборостроения инженерной академии РУДН

Научный руководитель: заслуженный работник высшей школы РФ, доктор технических наук, профессор
Патрахальцев Николай Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, зав. отделом теории рабочих процессов и имитационного моделирования энергетических установок **Козлов Андрей Викторович**, ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»;

кандидат технических наук, доцент **Дунин Андрей Юрьевич**, ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», каф. теплотехники и автотракторных двигателей.

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева»

Защита диссертации состоится « 23 » октября 2018 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.09 при ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Рубцовская наб. 2/18, Учебно-лабораторный корпус, ауд. 947.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана на сайте www.bmstu.ru

Автореферат разослан « ____ » _____ 2018 г.

Отзывы на автореферат просим представлять в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью, по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул. д. 5 стр. 1, МГТУ и. Н.Э. Баумана, учёному секретарю диссертационного совета Д 212.141.09.

Учёный секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент

Тумашев Р.З.

Основные обозначения и сокращения, принятые в работе

ВСХ - внешняя скоростная характеристика дизеля.

КПД - коэффициент полезного действия.

ЛВД - линия высокого давления.

ЛНД - линия низкого давления.

МН - малые нагрузки.

НУР - неуставившийся режим работы.

ОЦ - отключение цилиндра, цилиндров.

РНД - регулирование начального давления.

СОЦЦ - система отключения цилиндров или циклов.

ТА - топливная аппаратура.

ТНВД - топливный насос высокого давления.

УР - установившийся режим работы.

ФХР - «физико - химическое» регулирование дизеля, т. е. регулирование дизеля изменением физико - химических и моторных свойств топлива.

ХХ - холостой ход двигателя.

$\xi_{\text{полн}}$ - полная работа, выполняемая двигателем, [Дж].

$Ly^{\wedge}$ - удельная работа, выполняемая двигателем, [Дж/(дм)].³

V_h, iV_h, zV_h - рабочий объём цилиндра, рабочий объём полноразмерного двигателя и рабочий объём двигателя с отключением цилиндров или циклов [дм³].

i, z - число цилиндров полноразмерного двигателя и число активных (работающих) цилиндров двигателя с отключением цилиндров.

Основные определения

Активный цилиндр дизеля - цилиндр работающий, находящийся в работе, выполняющий некоторую работу.

Деактивированный цилиндр дизеля - выключенный, отключённый цилиндр дизеля, регулируемого изменением активного рабочего объёма.

Отключённый, деактивированный цилиндр - в данной работе, если это не оговорено особо, цилиндр дизеля, в который прекратилась подача топлива.

Полноразмерный дизель - дизель, работающий при всех активных цилиндрах, т.е. без отключения цилиндров, дизель в штатном исполнении.

Активный рабочий объём дизеля - сумма рабочих объёмов работающих (активных) цилиндров дизеля.

Регулирование дизеля изменением его активного рабочего объёма - в данной работе это регулирование отключением - включением части цилиндров или циклов работы дизеля, путём отключения подач топлива в отключаемые цилиндры.

Регулирование дизеля пропуском вспышек - аналогия с регулированием отключением цилиндров или циклов.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы:

В условиях эксплуатации современные автотракторные дизели длительное время работают на режимах малых нагрузок (МН) и холостых ходов (ХХ). На этих режимах удельные расходы топлива возрастают, в срав-

нении с расходами, свойственными режимам средних и повышенных нагрузок, возрастают и удельные выбросы CO_2 , относящегося к парниковым газам. При этом возрастают выбросы с отработавшими газами (ОГ) токсичных компонентов, в том числе сажи. Длительная работа на таких режимах сопровождается снижением вязкости смазочного масла из-за попадания в него несгоревшего топлива, повышением отложений нагара на деталях цилиндра - поршневой группы, лопатках турбокомпрессоров дизелей с наддувом, закоксовыванием сопловых отверстий форсунок и т.д. В конечном итоге всё это приводит к снижению долговечности и надёжности работы двигателя, требует более трудоёмкого и сложного технического обслуживания, более частого ремонта.

Одним из методов повышения экономичности, снижения токсичности и дымности выбросов, улучшения ряда других эксплуатационных качеств автотракторных дизелей при реализации режимов малых нагрузок (МН) и холостых ходов (ХХ) является метод регулирования изменением их активных рабочих объёмов, что в простейшем случае достигается отключением части цилиндров или циклов, путём выключения подачи топлива в отключаемые цилиндры. Метод активно применяется в автомобильных двигателях с искровым зажиганием. В меньшей степени он реализован в автотракторных дизелях, особенно с малым числом цилиндров. Объясняется это в значительной степени сложностью технических решений для его реализации, недостаточностью информации о возможностях повышения экономичности и экологичности дизелей, реализующих метод в условиях эксплуатации.

Цель работы: разработка методов повышения экономичности и снижения токсичности и дымности выбросов автотракторных дизелей на режимах малых нагрузок регулированием их активных рабочих объёмов.

Задачи исследования: для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи.

1. Провести теоретический анализ возможностей улучшения экономических и экологических качеств дизеля, работающего на режимах малых нагрузок.
2. Систематизировать и обобщить возможные задачи из условий эксплуатации дизелей, при решении которых целесообразно применение метода регулирования дизеля отключением цилиндров или циклов.
3. Адаптировать к конкретным дизелям - объектам исследования - разработанную ранее модель и методику расчётно - экспериментальной количественной оценки влияния отключения цилиндров на эколого - экономические показатели дизелей.
4. Провести численные эксперименты по определению количественных показателей возможного повышения экономичности и снижения дымности и токсичности дизеля, регулируемого отключением цилиндров, в том числе с малым числом цилиндров.

Объекты и методы исследований: объектами исследований являются автотракторные дизели, работающие в широком диапазоне эксплуа-

тационных нагрузок, в том числе со значительной долей МН и ХХ. Решение поставленных задач в соответствии с поставленной целью осуществляется обобщением ранее полученных данных, как опубликованных в доступных источниках информации, так и собственных расчётно-аналитических и экспериментальных данных, с использованием теоретического анализа, компьютерного моделирования, в том числе на основе специально разработанных методик.

Степень обоснованности научных положений, рекомендаций и выводов, полученных соискателем, достаточно высока, так как в работе применены современные расчётно-экспериментальные методы исследований с использованием опубликованной экспериментальной информации, обработанной с применением соответствующих компьютерных программ. Достоверность результатов определяется их сходимостью с опубликованными данными, а также отсутствием противоречий между результатами исследования и фундаментальными законами физики и механики.

Научная новизна работы:

1. Предложена новая схема систематизации, обобщения целей и задач, решение которых целесообразно с применением метода отключения цилиндров или циклов.

2. Адаптированы к конкретным объектам исследования математические модели анализа эффективности метода отключения цилиндров и получены конкретные количественные показатели, иллюстрирующие эффективность метода.

3. Обоснована целесообразность применения метода отключения цилиндров для дизелей с малым числом цилиндров.

4. Разработаны методические положения, позволяющие рекомендовать операции регулирования дизеля отключением цилиндров в случае применения на нём систем нейтрализации отработавших газов.

Практическая ценность работы: разработанные методики и методические положения по определению режимов эффективности отключения цилиндров могут позволить решать прикладные задачи в области проектирования и создания машин с повышенными экономическими и экологическими качествами, достижимыми благодаря совершенствованию протекания режимов малых нагрузок дизелей. Разработаны схемы, алгоритмы управления отключением цилиндров дизеля, работающего на режимах малых нагрузок, обеспечивающих рационализацию создаваемых систем малотоксичного дизеля.

Реализация результатов работы: результаты работы используются в учебном процессе Российского университета дружбы народов при чтении курсов по теории ДВС для студентов бакалавриата, магистратуры, а также для аспирантов.

Апробация работы: основные положения диссертации докладывались на научно-технических конференциях инженерного факультета РУДН, а также

- на Международной научно - практической конференции молодых учёных, аспирантов и соискателей «Знания молодых: наука, практика и инновации». Киров 2013;
- на VII^й международной научно - практической конференции «Наука- Технология- Ресурсосбережение», в г. Киров, 6 февраля 2014 г.;
- на Второй Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы морской энергетики», 14 февраля 2013 г. Санкт-Петербург, - СПбГМТУ;
- на 88-ом Всероссийском научно-техническом семинаре по автоматическому управлению и регулированию теплоэнергетических установок в МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2014 г.;
- на VIII^й Международной научно-практической конференции «Инженерный системы - 2015», М.: РУДН, в 2015 г.;
- на заседаниях кафедры теплотехники и тепловых двигателей инженерного факультета РУДН.

Публикации: по материалам диссертации опубликовано 8 научных трудов, все - в журналах, рекомендованных ВАК РФ, общем объемом 4 п.л.

Структура и объём работы:

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, общих выводов по работе и списка литературы из 113 наименований. Общий объём работы составляет 155 страниц. Количество рисунков 126 и 1 таблица.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность диссертационного исследования, приведена научная новизна и практическая ценность работы, дана общая характеристика диссертации.

В первой главе проведён анализ опубликованных по рассматриваемой проблеме работ и отмечено, что метод совершенствования экономических, экологических и других характеристик дизелей, работающих на режимах малых нагрузок (МН) и холостых ходов (ХХ), основанный на регулировании активного рабочего объёма двигателя, применяется на практике уже на сравнительно большом количестве двигателей, в том числе и дизелей. И всё же практическая реализация метода на автотракторных дизелях имеет известные сложности, в связи с чем он более существенно применяется на многоцилиндровых двигателях с искровым зажиганием. Основной целью метода является прежде всего повышение экономичности режимов МН и ХХ. Всё больше работ посвящаются проблеме применения метода для снижения токсичности и дымности отработавших газов и совершенствования других эксплуатационных показателей. Совершенствованию показателей работы дизелей на режимах МН и ХХ посвящены работы ряда отечественных и зарубежных учёных: Балабин В.Н., Березний В.В., Геращенко В.В., Грехов Л.В., Гутаревич Ю.Ф., Драгунов Г.Д., Зленко В.М., Кутенёв В.Ф., Манохин В.А., Марков В.А., Медведев А.Н., Николаенко А.В., Никольский Н.А., Патрахальцев Н.Н., Петелин А.А., Симсон А.Э., Славущ-

кий Б.М., Суркин В.И., Тер-Мкртчян Г.Г., Федосеев С.Ю., Филиппов А.З., Хомич А.З., Peters G.F. Nester T.M., Henry W., Hafbauer Peter и других.

До настоящего времени опубликованная информация по анализу эффективности метода применительно к дизелям автотракторного назначения нередко носит противоречивый характер как в части возможности повышения экономичности, так и в части совершенствования других показателей работы дизеля. По результатам анализа сформулирована цель работы и задачи, решение которых необходимо для достижения поставленной цели.

Во второй главе проведён теоретический анализ, который подтвердил принципиальные возможности повышения экономичности и экологических качеств дизелей при работе на режимах МН и ХХ. Для оценки возможного, ожидаемого повышения экономичности при отключении части цилиндров предложен показатель относительной экономичности режима, представляющий собой отношение максимального удельного расхода топлива на режимах 10 - 20 % от полной нагрузки к уровню минимального удельного расхода. Приведено описание ранее разработанной системы отключения цилиндров или циклов (СОЦЦ) дизеля, содержащей в себе также возможности регулирования начального давления (РНД) топлива в линиях высокого давления (ЛВД) при переходных процессах в топливной аппаратуре при выключениях - включениях цилиндров или циклов.

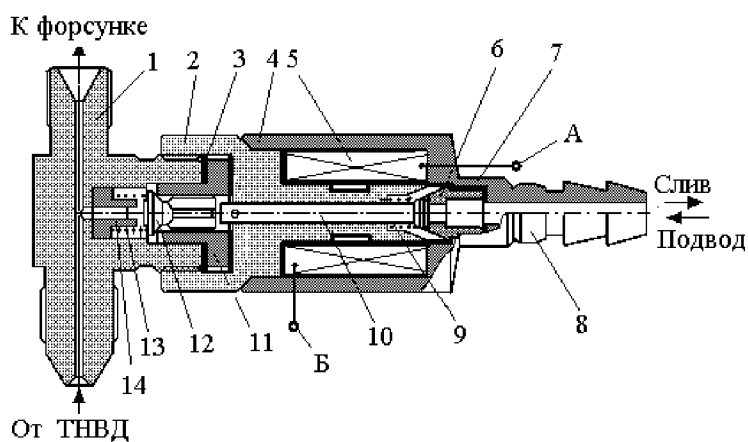


Рис. 1. Схема отключателя подачи топлива к форсунке дизеля от ТНВД: А, Б-контакты электропитания катушки; 1-штуцер; 2-корпус; 3-уплотнение; 4-корпус электромагнитной катушки; 5-электромагнитная катушка; 6-магнитный сердечник; 7-изоляция; 8-ниппель; 9-возвратная пружина; 10-полый шток; 11-седло клапана регулирования начального давления (РНД); 12-клапан РНД; 13-ограничитель хода клапана РНД; 14-возвратная пружина клапана РНД

Принцип работы отключателя (Рис. 1) состоит в том, что открытие клапана РНД 12 происходит под действием волны пониженного давления, сформированной в ЛВД при отсечке подачи топлива. Удержание клапана в

открытом положении достигается благодаря электромагнитной катушке 5 со штоком 10. Тогда очередная подача топлива не впрыскивается в цилиндр, а сливается в линию низкого давления (ЛНД). Цилиндр отключается, деактивируется. В работающих, активных, цилиндрах при открытии клапана РНД 12 он не удерживается в открытом состоянии (катушка 5 выключена) и через него из ЛНД происходит подпитка ЛВД до некоторого повышенного и стабильного начального давления. Использование именно такого отключателя позволяет в топливных системах разделённого типа получить возможности отключения отдельных циклов и оперативно менять количество и порядок отключения цилиндров.

Изложены основы метода отключения цилиндров или циклов и методики расчётной оценки его эффективности (математической модели), основанной на использовании экспериментально полученных универсальных (многопараметровых - МПХ) характеристик дизеля, содержащих параметрические кривые постоянных удельных эффективных расходов топлива и постоянных объёмных концентраций токсичных составляющих ОГ в координатах M_e или $p_e - n$, перестроенных в координаты удельной работы, выполняемой дизелем - частоты вращения ($L_w - n$). Проиллюстрированы целесообразности замены ординат M_e или p_e традиционных универсальных характеристик на ординаты регулируемой удельной работы, выполняемой дизелем, при неизменности полной работы ($\xi_{\text{полн}}$), совершаемой дизелем.

Допустим, что режим полноразмерного дизеля задан через среднее эффективное давление p_e , МПа. Тогда

$$\dot{Q}_{\text{ОЛН}} = 500 \cdot p_e \cdot i \cdot V_h, \text{ Дж} \quad (1)$$

Для полноразмерного дизеля удельная работа равна

$$L_{\text{уд}} = 500 \cdot p_e, \text{ Дж/дм}^3 \quad (2)$$

Для дизеля с отключением части цилиндров, т.е. с числом активных цилиндров z , при выполнении той же полной работы, получаем:

$$B_{\text{yd}} = 500 \cdot p_e \cdot i \cdot V_h / (z \cdot V_h) = 500 \cdot p_e \cdot i / z, \text{ Дж/дм}^3 \quad (3)$$

Проведён анализ возможности допущения о постоянстве абсолютных значений механических потерь полноразмерного дизеля и дизеля с отключением цилиндров на тех же скоростных режимах.

Для дизелей со свободным газотурбинным наддувом при отключении части цилиндров и анализе допустимого уровня нагрузки активных цилиндров показана целесообразность её ограничения по уровню коэффициентов избытка воздуха полноразмерного безнаддувного дизеля.

Изложена расчётно-экспериментальная методика оценки показателей токсичности и дымности выбросов дизеля на режимах МН при регулировании его рабочего объёма. Для расчётов используются экспериментальные универсальные характеристики дизеля, содержащие параметрические кривые концентраций соответствующих токсичных компонентов ОГ, также перестроенные в координаты $L_{\text{yd}} - n$. Расчёты ведутся по следующим соотношениям:

$$G_{nox} = 0,00158 / C_{max}^{ог}, \text{ г/час} \quad (4)$$

$$G_{co} = 0,000966 \cdot C_{co} \cdot G_{ог} [\text{г/час}] \quad (5)$$

$$g_{co} = G_{co} / N_e [\text{г/(кВт-ч)}] \quad (6)$$

$$G_{ch} = 0,0004 / 8 C_{ch}^{ог} [\text{г/час}] \quad (7)$$

$$g_{ch} = G_{ch} / N_e [\text{г/(кВт ч)}] \quad (8)$$

где: C_{nox} , C_{co} , C_{ch} - измеренные на каждом режиме объёмные концентрации оксидов азота, оксидов углерода и углеводородов (при отключении части цилиндров концентрации и массовые выбросы NC_x , CO и CH относятся только к активным цилиндрам);

$G_{ог}$ - часовой расход отработавших газов, определяемый как сумма часовых расходов топлива G_x и воздуха $G^{\wedge}$ кг/ч. (При отключении части цилиндров расход ОГ определяется для активных цилиндров).

Для полноразмерного дизеля на данном режиме:

$$G_x = g_e N_e \cdot 10^{-3} \text{ кг/ч} \quad (9)$$

(g_e определяется по универсальным характеристикам при данных $L^{\wedge}$ и n).

$$G_{or} = G_e + G_{gi} \cdot V_h^{\wedge} u_{hp} n \cdot 10^{-6} \cdot 30 + G^{\wedge}, \text{ кг/ч} \quad (10)$$

где η_p - коэффициент наполнения и плотность воздуха.

Проведена оценка адекватности результатов применения расчётно-экспериментальной методики и результатов опубликованных экспериментальных исследований. Показано, что получаемые в расчёте данные являются идеальными и реально могут быть снижены на 40 - 50 %, если приходится ограничивать применимость метода с учётом ограничительных параметров. К ним относятся следующие: реализация «гистерезиса» при выключении - включении цилиндров, задержка теплового состояния, отказ от работы на первой и второй передачах, ограничение уровня вибрации, работа на XX , повышенная частота вращения, газотурбинный наддув дизеля и т.д.

Дополнена схема систематизации целей и задач, решение которых возможно с использованием метода регулирования дизеля изменением его активного рабочего объёма путём отключения подач топлива. Схема включает следующие позиции: 1 - повышение экономичности, 2 - снижение токсичности и дымности, 3 - повышение эффективности и устойчивости холодных пусков, 4 - диагностирование технического состояния в условиях эксплуатации, 5 - аварийная защита, 6 - замена вспомогательного двигателя, 8 - повышение устойчивости режимов MH и XX , 8 - повышение эффективности использования альтернативных топлив и расширение их номенклатуры, 9 - повышение динамических качеств ряда НУР, 10 - поддержание повышенного теплового состояния дизеля на режимах MH и XX , 11 - ускорение прогрева нейтрализатора ОГ, 12 - повышение эффективности работы системы нейтрализации ОГ, 13 - сокращение времени прогрева до приёма повышенной нагрузки, 14 - дискретное регулирование, 15 - снижение минимально устойчивой частоты вращения вала.

В третьей главе приведены основные методические положения, предваряющие расчётное исследование, результаты которого изложены в

главе 4. Изложены основные сведения об объекте исследования - дизеле типа Д-120 (2 Ч 10,5/12), с целью выявления целесообразности применения метода на малоцилиндровых двигателях. Дизель Д-120 имеет камеру в поршне, $D/S = 10,5/12$, $i = 2$, $A_{г. н о м} = 11,3$ кВт, $M_{г. н о м} = 107,6$ Н-м, $n_{н о м} = 2000$ мин⁻¹, $C_p = 8,0$ м/с, $P_{г. н о м} = 0,65$ МПа, $g_e = 245$ г/(кВт-ч), $g_H = 1,5$ г/(кВтч), $V_h = 1,04$ дм³, $iV_h = 2,08$ дм³. Приведены стандартные полученные экспериментально универсальные (многопараметровые) характеристики дизеля Д-120, перестроенные в координаты $L_{y_d} - n$, по показателям g_e , дымности ОГ и по концентрациям компонентов ОГ: C_{NOx} , C_{co} , C_{CH} . Изложена методическая часть по двигателю типа КамАЗ-7406. Т.е. приведены его универсальные характеристики, перестроенные в координаты $L_{y_d} - n$.

Приведены основные данные по объекту исследования - дизелю автомобиля *Golf* фирмы *VW* ($A_{г. н о м} = 36,6$ кВт при 5000 мин⁻¹, $D/S = 7,65/8,15$). Приведены основные параметры и показатели дизеля и его универсальные характеристики. Расчётным путём получены рекомендации законов нагружения дизеля *Golf* для реализации режимов работы по заданной характеристике сопротивления при движении автомобиля на четвертой передаче с условием минимизации удельных расходов топлива и токсичных выбросов. Проведено сравнение характеристик разгонов дизеля *Golf* по ВСХ как полноразмерного, так и с чередованием отключения разного количества цилиндров, с целью снижения токсичности и дымности.

В четвёртой главе с использованием изложенной выше методики и универсальных характеристик малоцилиндрового дизеля типа Д-120 расчётами показана возможность повышения на 25 - 27 % экономичности режимов двенадцати процентной нагрузки во всём диапазоне частот вращения. При нагрузке 35 % эти цифры составляют 16 - 25 %, а при нагрузке порядка 48 % уже 8 - 12 %, причём, только в области повышенных частот вращения. Для последующего обобщения результатов исследования полученные характеристики аппроксимированы зависимостями, хорошо отражающими тенденции изменения выигрышей Ag_e в расходах топлива:

$$Ag_e = ((g_{e,i} - g_{e,z}) / g_{e,-}) \cdot 100, \% \quad (11)$$

где $g_{e,i}$ и $g_{e,z}$ - соответственно удельные расходы топлива полноразмерного дизеля и дизеля с z активных цилиндров на том же режиме. Показаны возможности одновременного снижения расхода топлива и уменьшения выбросов NO_x дизелем Д-120 при отключении цилиндра (Рис. 2).

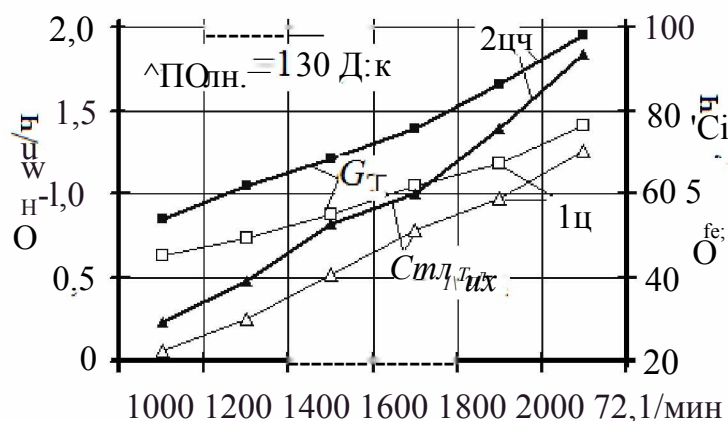


Рис. 2. Дизель Д-120, характеристики изменения часового расхода топлива (G_x , кг/ч) и часовых выбросов оксидов азота (G_{NOx} , г/ч) при работе с малой нагрузкой ($\varphi_{полн.} = 130$ Дж) на двух (2 ц) и одном (1ц) активных цилиндрах

Аналогичные характеристики построены также для нагрузок, при которых дизель совершает полные работы 260, 390 и 520 Дж. Собранная информация обобщена на гистограмме Рис. 3.

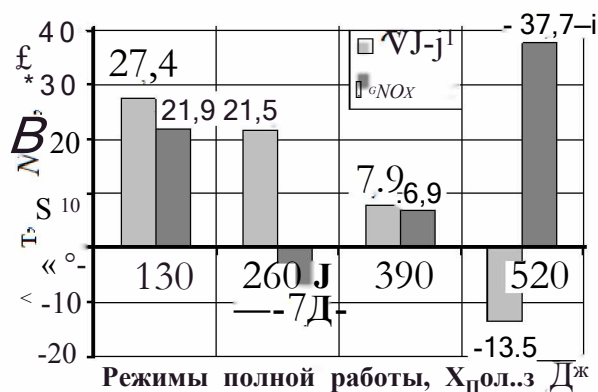


Рис. 3. Выигрыши (проигрыши - отрицательные значения) в расходах топлива G_x и выбросах оксидов азота G_{NOx} при отключении одного цилиндра и равновероятной работе во всём диапазоне частот вращения и разных уровнях полной работы (520 Дж - перегрузка дизеля на одном цилиндре)

Выполнен анализ изменений коэффициентов избытка воздуха дизеля Д-120 при работе на двух и одном цилиндрах при выполнении одинаковой работы. Так, при $\varphi_{полн.} = 130$ Дж а полноразмерного дизеля меняется в пределах 3,9 - 4,9 во всём диапазоне частот вращения, а при отключении цилиндра - 2,8 - 3,1. При этом выигрыши в расходе топлива (Δg_c) и выбросах оксидов азота (ΔNO_x) составляют соответственно ~ 27 и ~ 23 %. Аналогичные расчёты выполнены для других уровней нагрузок, вплоть до перегрузок дизеля с одним активным цилиндром, когда α снижается до 1,0 и ниже, что объясняет резкое повышение дымности ОГ и снижение выбросов NO_x . Проанализированы возможности снижения дымности ОГ, а также выбросов сажи дизелем Д-120 при отключении цилиндра (Рис. 4).

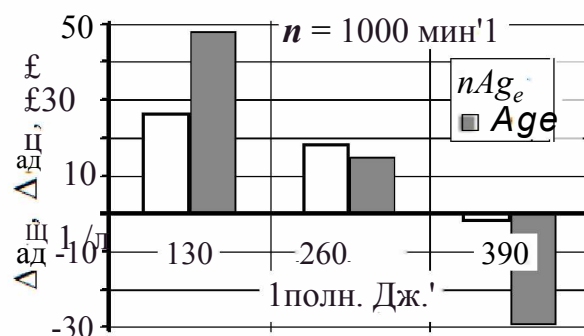


Рис. 4. Относительные выигрыши в удельном расходе топлива (Age) и в удельных выбросах сажи (Age_c) при разных уровнях исходной полной работы $L_{полн}$ при $n=1000 \text{ мин}^{-1}$

Расчёты выполнены для разных частот вращения и частично обобщены на Рис. 5.

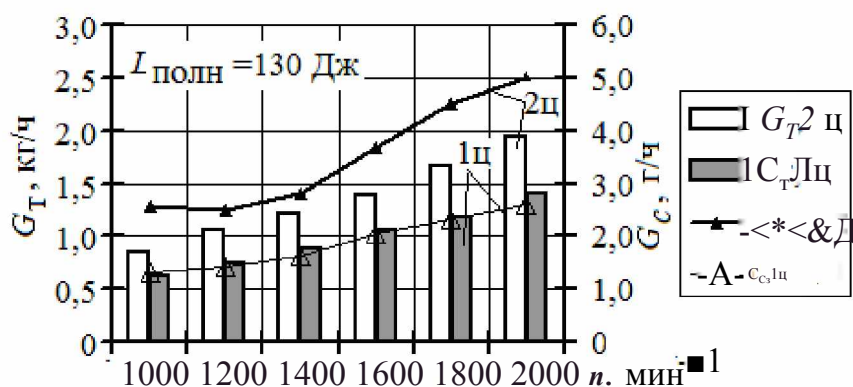


Рис. 5. Скоростные характеристики изменения часового расхода топлива (G_t , кг/ч) и часовых выбросов сажи (G_c , г/ч) при работе с малой нагрузкой ($L_{полн}=130 \text{ Дж}$) на двух (2ц) и одном (1ц) активных цилиндрах (Д-120)

Сравнительный анализ возможности экономии топлива и изменения выбросов NO_x , сажи, CO и CH приведён на рисунках типа Рис. 6.

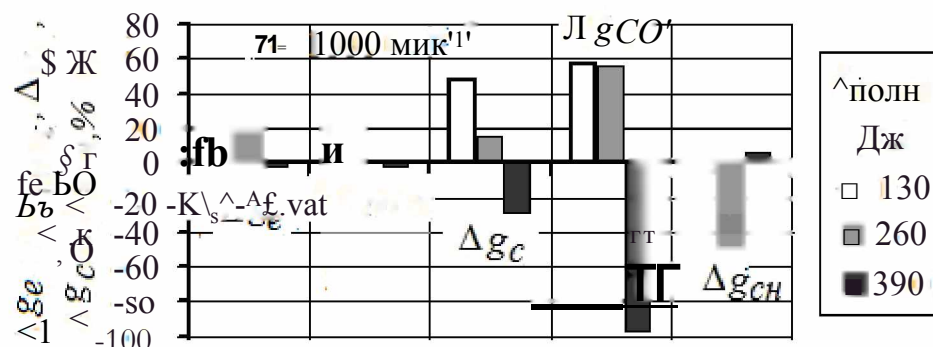


Рис. 6. Влияние отключения цилиндра и исходной величины нагрузки ($L_{полн}$) при данной частоте вращения ($n=1000 \text{ мин}^{-1}$) на относительные выигрыши (или проигрыши - отрицательные значения) в удельных расходах топлива (Age), в удельных выбросах

оксидов азота (Ag_{NOx}), сажи (Ag_c), оксидов углерода (Ag_{CO}) и углеводородов (Ag_{CH}) (Д-120)

На примере дизеля типа КамАЗ-7406 предложены и расчётным путём исследованы возможности реализации комплексного метода снижения токсичности выбросов путём сочетания отключения цилиндров и циклов (СОЦЦ) и нейтрализации ОГ (НОГ) на режимах МН, когда из-за низких температур ОГ каталитический нейтрализатор не эффективен. На полных нагрузках нейтрализатор эффективно снижает концентрацию CO в ОГ. На малых нагрузках выбросы CO можно снизить путём отключения части цилиндров. Кроме того, благодаря повышенной нагрузке активных цилиндров повышается эффективность каталитического нейтрализатора отработавших газов (НОГ), если к нему подаются ОГ только оставшихся в работе цилиндров, что требует соответствующего изменения системы выпуска ОГ. В результате комплексного применения СОЦЦ и НОГ выбросы CO могут уложиться в допустимый норматив, например, 100 г/ч (Рис. 7).

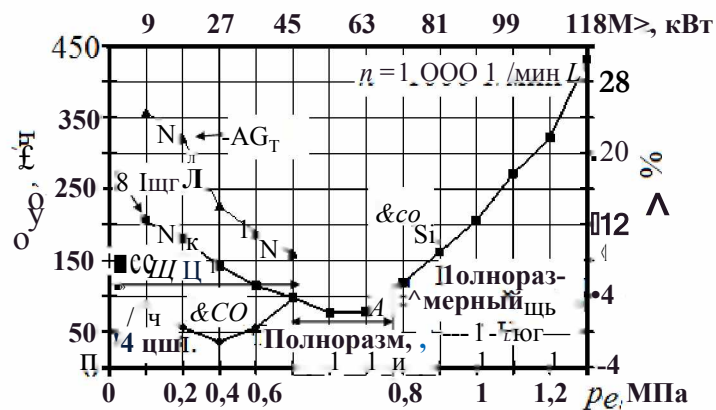


Рис. 7. Дизель типа КамАЗ-740, нагрузочные характеристики при $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$ по показателям часового выброса оксидов углерода (G_{CO}) для случаев работы полноразмерного дизеля (8 цилиндров) и дизеля с числом активных цилиндров $z = 4$ (4 цилиндра), а также ожидаемая экономия в часовом расходе топлива (AG_X) при отключении четырёх цилиндров на режимах МН; обозначения: СОЦЦ - работа дизеля с системой отключения цилиндров или циклов, НОГ - желательна работа дизеля с системой каталитической нейтрализации ОГ. (Шкала N_e применима к обоим вариантам дизеля, шкала p_e - только к полноразмерному)

Расчёты выполнены для всего диапазона частот вращения. По результатам расчётов разработана графическая схема (Рис. 8) рекомендаций по реализации комплексного метода снижения выбросов оксидов углерода сочетанием метода отключения цилиндров и нейтрализации ОГ.

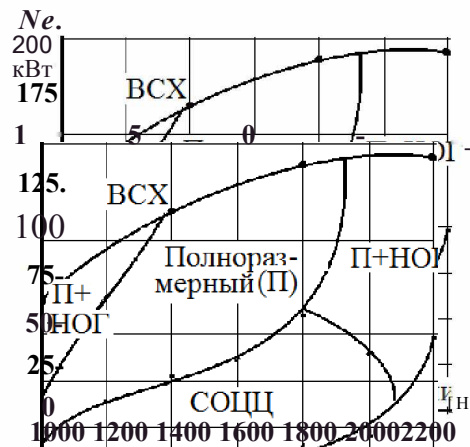


Рис. 8. Схема диапазонов режимов работы дизеля КамАЗ, в которых целесообразно включать СОЦЦ или СОЦЦ с нейтрализатором ОГ (СОЦЦ+НОГ), а также режимов работы полноразмерного дизеля без нейтрализатора и с нейтрализатором (П.+НОГ) для поддержания часовых выбросов оксидов углерода на заданном уровне, не превышающем 100 г/ч

Далее в работе исследованы характеристики 4-х цилиндрового дизеля легкового автомобиля *VW Golf* при работе на нагрузочных режимах (А"-Е-*F*), соответствующих установившимся движениям автомобиля на четвертой передаче во всём диапазоне частот вращения дизеля: А-В - движение на двух активных цилиндрах, С-Д - на трёх цилиндрах и Е-*F* - на четырёх (приняты равновероятные продолжительности на каждом из девяти скоростных режимов, т.е. по одному часу, а в сумме - 9 часов) (Рис. 9).

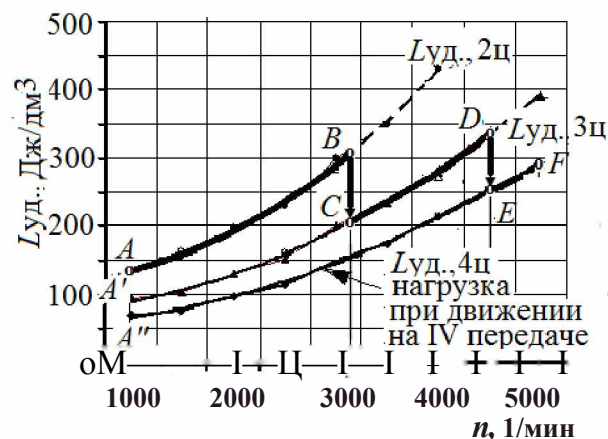


Рис. 9. Установившиеся режимы работы дизеля автомобиля *VW Golf*, движущегося на четвертой передаче с разным числом активных цилиндров

Относительные выигрыши в расходах топлива при переходе на работу на двух цилиндрах в диапазоне частот вращения вала 1000 - 3150 составляют 42 - 22 %, а на трёх цилиндрах в диапазоне частот от 1000 до 4500 - 22 - 8 % в зависимости от частоты вращения. Суммарные расходы топлива (G_z) при равновероятной реализации режимов нагрузки $M_c = fn$ с

разными числами активных цилиндров ($z = 4, 3, 2$) составляют соответственно 46,4; 43,35 и 41,7 кг, а выигрыши в расходах (AG), полученные благодаря отключению цилиндров, составляют 6,7 и 10,1 %.

Выбросы сажи и оксидов азота при реализации тех же режимов при работе последовательно с ростом частоты вращения на двух, трёх и четырёх цилиндрах показаны на Рис. 10, 11.

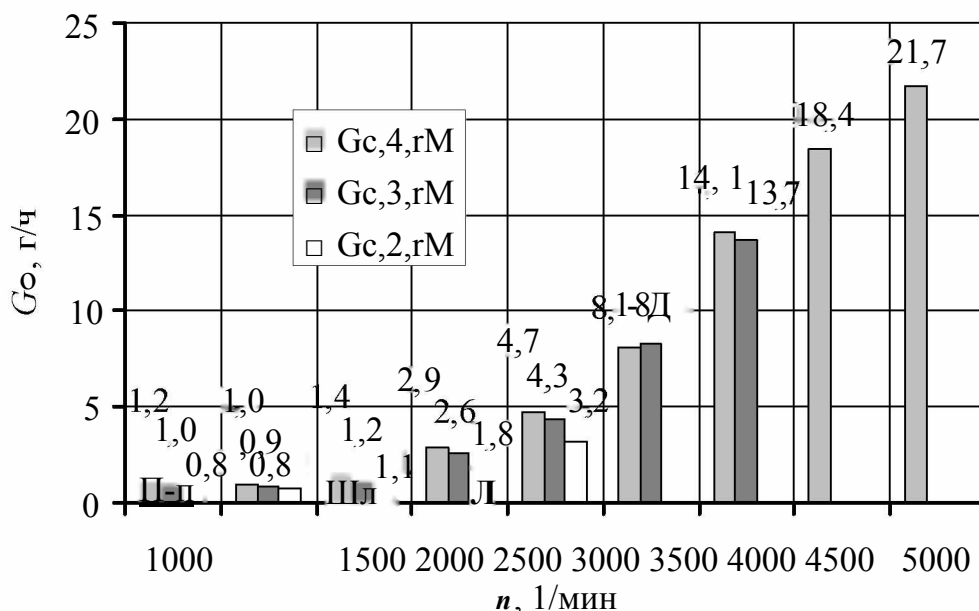


Рис. 10. Влияние отключения цилиндров (числа активных цилиндров: 4, 3, 2) дизеля *Golf* на выбросы сажи при реализации тех же исходных режимов движения на четвертой передаче

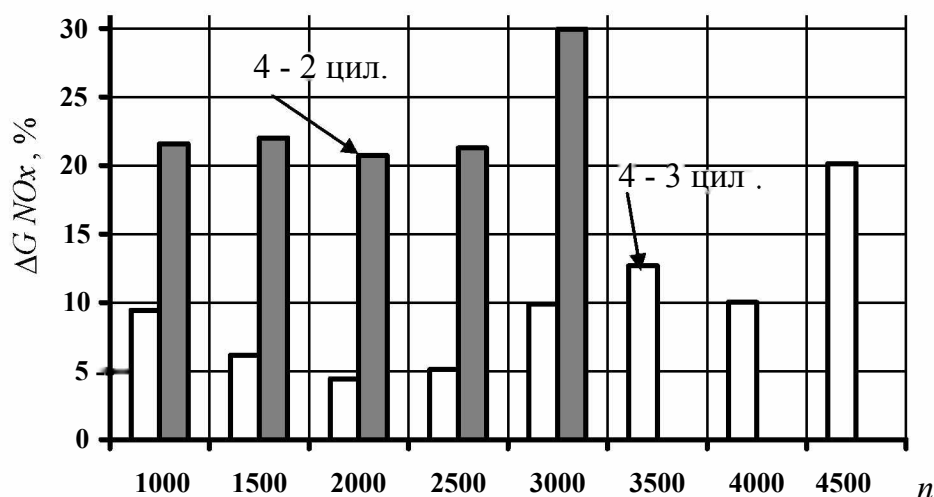


Рис. 11. Выигрыши (уменьшения) в выбросах оксидов азота с ОГ дизеля легкового автомобиля *Golf* при движении на четвертой передаче при разном числе активных цилиндров ($z=3, 2$) по сравнению с выбросами полноразмерного дизеля ($=z=4$)

Таким образом, показано, что благодаря регулированию дизеля *Golf* изменением его рабочего объёма (при равновероятности реализуемых режимов работы автомобиля на четвертой передаче во всём диапазоне частот

вращения) достигается экономия топлива в количестве $\sim 8,7$ %, снижение выбросов оксидов азота на $\sim 8,9$ %, снижение выбросов углеводородов на $\sim 7,5$ % и оксидов углерода на $\sim 6,6$ % по сравнению со случаем реализации той же совокупности режимов полноразмерным дизелем.

Общие выводы и рекомендации:

1. Адаптированы к конкретным дизелям - объектам исследования разработанные ранее модель и методика количественной оценки влияния отключения цилиндров на эколого - экономические показатели дизелей. Проведены численные эксперименты по определению количественных показателей возможного повышения экономичности и снижения дымности и токсичности дизелей типа Д-120, КамАЗ-740 и *Golf* фирмы *VW* при регулировании их изменением рабочих объёмов путём отключения цилиндров. Проведён теоретический анализ и подтверждены возможности улучшения экономических и экологических качеств малоцилиндрового дизеля, работающего на режимах малых нагрузок

2. Систематизированы и обобщены возможные цели и задачи из условий эксплуатации дизелей, при решении которых целесообразно применение метода регулирования дизеля изменением его рабочего объёма путём отключения цилиндров или циклов.

3. Показана возможность повышения экономичности режимов малых нагрузок дизеля с малым числом цилиндров на примере результатов исследования двухцилиндрового дизеля Д-120 (2 Ч 10,5/12) с отключением одного цилиндра. Показано, что при средней нагрузке порядка 20 % от уровня ВСХ ожидаемый экономический эффект может составить 13 - 26 % по отношению к экономичности полноразмерного дизеля, соответственно при учёте и без учёта ограничительных показателей. При нагрузке порядка 40 % - 11 - 22 %. При нагрузке около 50 % экономичность может быть повышена отключением цилиндра только в области высоких частот вращения на величину 5 - 10 % от уровня расхода полноразмерного дизеля на том же режиме. При этом часовые выбросы сажи могут быть снижены на 40 - 45 % во всём диапазоне частот вращения. Показана возможность снижения удельного расхода топлива при одновременном уменьшении выбросов оксидов азота дизелем типа Д-120 при отключении цилиндра. На режимах порядка 20 % от полной нагрузки снижение часовых выбросов оксидов азота составляет порядка 21 %, при снижении расхода топлива на 27 %.

4. Предложен и на примере дизеля типа КамАЗ-740 исследован метод комплексного снижения выбросов оксидов углерода сочетанием отключения цилиндров и каталитической нейтрализации ОГ. Разработана графическая схема рекомендаций по реализации комплексного метода снижения выбросов оксидов углерода.

5. Показано, что благодаря регулированию дизеля *Golf* изменением его рабочего объёма при равновероятности реализуемых режимов работы автомобиля на четвертой передаче во всём диапазоне частот вращения достигается экономия топлива в количестве $\sim 8,7$ %, снижение выбросов

оксидов азота на ~ 8,9 %, снижение выбросов углеводородов на ~ 7,5 % и оксидов углерода - на ~ 6,6 % по сравнению со случаем реализации той же совокупности режимов полноразмерным дизелем.

Основные положения диссертации изложены в следующих работах:

1. Снижение дымности отработавших газов дизеля путём добавки альтернативных топлив к основному / Камышников Р.О. [и др.] Транспорт на альтернативном топливе, 2014, № 1 (37). С. 9-14. (0,56 п.л. / 0,32 п.л.).

2. Анализ возможности снижения расхода топлива и токсичности выбросов дизеля на режимах малых нагрузок / Камышников Р.О. [и др.] Транспорт на альтернативном топливе, 2014, № 6. С. 51-56. (0,64 п.л. / 0,39 п.л.).

3. Повышение экономических и экологических качеств транспортного дизеля при работе на режимах малых нагрузок и холостых ходов (статья) / Камышников Р.О. [и др.] АвтоГазоЗаправочный Комплекс и Альтернативное топливо, 2014, № 12 (93). С. 41-47. (0,44 п.л. / 0,26 п.л.).

4. Снижение токсичности дизеля на режимах малых нагрузок отключением части цилиндров / Камышников Р.О. [и др.] Тракторы и сельхозмашины, 2015, № 1. С. 5-8. (0,51 п.л. / 0,24 п.л.).

5. Снижение расхода топлива и токсичности выбросов дизеля на режимах малых нагрузок при его регулировании изменением рабочего объёма / Камышников Р.О. [и др.] Двигателестроение, 2015, № 1 (259). С. 26-29. (0,31 п.л. / 0,21 п.л.).

6. Снижение выбросов оксидов углерода дизелем путём отключения цилиндров при работе на режимах малых нагрузок / Камышников Р.О. [и др.] Строительные и дорожные машины, 2015, № 11. С. 18-22. (0,81 п.л. / 0,55 п.л.).

7. Камышников Р.О. Возможности снижения дымности отработавших газов дизеля, регулируемого изменением его рабочего объёма. // ВЕСТНИК РУДН, 2015. С. 136-138. (0,83 п.л.).

8. Камышников Р.О. Возможности снижения дымности отработавших газов дизеля, регулируемого изменением его рабочего объёма // Автомобильная промышленность. 2016. № 1. С. 16-18. (1,2 п.л.)

В работах 1, 5 участие соискателя состоит в проведении адаптации расчётной методики к объектам исследования, в проведении расчётов и оформлении их результатов. В работах 2, 3, 4, 6, 7, 8 соискатель дополнил систематизацию целей и задач, решение которых возможно с помощью метода отключения цилиндров, настроил расчётно - экспериментальную методику (математическую модель) для проведения исследований выбранных дизелей, провёл основную серию численных экспериментов, обработал полученные данные, сформулировал результаты и сделал выводы в части возможностей улучшения показателей экономичности и экологичности автотракторных дизелей.