

На правах рукописи

ЛОТФУЛЛИН Шамиль Рафилевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И
ЭКОЛОГИЧНОСТИ АВТОМОБИЛЬНОГО ГАЗОВОГО
ДВИГАТЕЛЯ ИЗМЕНЕНИЕМ ЕГО
АКТИВНОГО РАБОЧЕГО ОБЪЁМА**

Специальность 05.04.02 – «Тепловые двигатели»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва, 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Научный руководитель: **Барченко Филипп Борисович**
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Поршневые двигатели» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Козлов Андрей Викторович** - доктор технических наук, профессор, заведующий отделом теории рабочих процессов и имитационного моделирования энергетических установок ГНЦРФ ФГУП «НАМИ»,
Хмелев Роман Николаевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Автомобили и автомобильное хозяйство» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тульский государственный университет».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Самарский государственный университет путей сообщения".

Защита диссертации состоится « 11 » июня 2019 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.09 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Рубцовская наб., 2/18, ауд. 947.

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

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим представлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, учёному секретарю диссертационного совета Д 212.141.09.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2019 г.



Учёный секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

Р.З. Тумашев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Одной из актуальных проблем современного двигателестроения является повышение экономических и экологических качеств автомобильного транспорта. Это связано с тем, что автомобильный транспорт выбрасывает в окружающую среду более 40% загрязняющих веществ от общей массы этих веществ, поступающих в атмосферу от всех источников загрязнений, включая промышленные производства, добывающую промышленность и т.д. Потребление углеродородных топлив автомобильным транспортом достигают 50 % от расходов всех потребителей таких энергоресурсов. Указанные проблемы могут быть решены путем использования в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) различных альтернативных топлив и, прежде всего, природного газа (ПГ). При этом используется как компримированный природный газ (КПГ), так и сжиженный природный газ (СПГ).

Известна проблема загруженности транспортных магистралей, особенно в условиях мегаполисов, приводящая к росту режимов малых нагрузок (МН) и холостых ходов (ХХ) двигателей. Эти режимы характеризуются повышенными расходами топлива и выбросами в окружающую среду вредных компонентов отработавших газов (ОГ) двигателей. Улучшение показателей двигателей на таких режимах может быть достигнуто, в частности, применением методов регулирования (управления) ДВС посредством отключения цилиндров или циклов на режимах МН и ХХ. Экспериментальные исследования эффективности таких методов сложны, дороги, и длительны. Применять их целесообразно только после проведения поисковых исследований. Методики обработки экспериментальных данных соответствующих рабочих процессов и режимов работы двигателей позволяют выбрать рациональные пути достижения поставленных целей. Для предварительной оценки путей повышения энергоэффективности и экологичности ДВС возможно использование экспресс-оценок. В представленной работе для оценки возможностей улучшения показателей топливной экономичности и токсичности ОГ двигателя в условиях эксплуатации путём отключения части цилиндров применена расчётно-экспериментальная методика обработки экспериментальных данных. Она основана на использовании экспериментальных универсальных (многопараметровых) характеристик исследуемых двигателей по показателям удельных эффективных расходов топлива и выбросов токсичных компонентов ОГ.

Цель работы: разработка метода повышения эксплуатационных экономических и экологических качеств автомобильного газового двигателя путём отключения части его цилиндров.

Объект исследования: автомобильный дизель 8ЧН12/13 модели КАМАЗ RGK.EC.820 с системой питания газом компании EControls (США). Этот двигатель изготавливается компанией РариТЭК из сборочного комплекта (номер по аталогу КАМАЗ: 820.62-1000400-55), выпуск которого освоен на заводе двигателей ПАО «КАМАЗ».

Методы исследований: в работе применены преимущественно методы численного эксперимента с использованием ранее опубликованных и полученных автором на моторном стенде экспериментально универсальных (многопараметровых) характеристик.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые разработана методика обработки и анализа экспериментальных данных для экспресс-оценки возможностей повышения топливной экономичности и снижения токсичности ОГ газового двигателя грузового автомобиля при работе на режимах малых нагрузок и холостого хода путём отключения части цилиндров;
2. При реализации этой методики произведён расчётный отдельный анализ выбросов неметановых (*НМНС*) и общих (*ТНС*) углеводородов. Показано, что, несмотря на более высокие общие выбросы углеводородов газовым двигателем в сравнении с двигателями, работающими на традиционном моторном топливе (дизельное топливо и бензин), выбросы неметановых углеводородов, как наиболее вредных, оказываются значительно меньше;
3. Предложены и проанализированы различные стратегии отключения цилиндров. В частности, рассмотрены варианты отключения двух и четырех цилиндров восьмицилиндрового двигателя на режимах малых нагрузок и холостого хода при реализации эксплуатационного ездового цикла городского автобуса.

Достоверность и обоснованность научных положений определяются:

- высокой точностью сертифицированного оборудования и моторных стендов (ISO 9001:2015 и IATF 16949:2016) независимой инжиниринговой компании EControls (США);
- допустимым уровнем сходимости результатов использования предложенной методики обработки экспериментальных данных с результатами опубликованных экспериментальных исследований;
- полученные результаты коррелируются с опубликованными экспериментальными данными и не противоречат фундаментальным законам теплофизики и теории рабочих процессов ДВС.

Практическая значимость работы состоит в том, что:

- разработанная методика обработки и анализа экспериментальных данных может применяться для экспресс-оценки возможностей повышения топливной экономичности и снижения токсичности ОГ газового двигателя, значительную часть времени работающего на режимах малых нагрузок и холостого хода;
- предложенные варианты регулирования дают возможность широкого выбора между более простым и более эффективным способами регулирования газового двигателя отключением части цилиндров. При реализации двигателем эксплуатационного ездового цикла городского автобуса при отключении 4-х цилиндров из 8-ми на режимах малых нагрузок и холостого хода можно ожидать экономии топлива до 16%. При этом снижение выбросов *CO*, *НМНС* и *ТНС* могут достигать соответственно 28, 20 и 23 % при практически неизменных выбросах *NO_x*. Реализация более сложного варианта отключения цилиндров, зависящего от текущей нагрузки (вариант $z=var$), экономия топлива может достигать 22 %. При

этом выбросы CO , $NMHC$ и THC снижаются на величины до 34, 32 и 33 % соответственно, а выбросы NO_x могут возрасти на величину до 11 %.

Реализация результатов работы Разработанные методики и полученные результаты исследования применяются при выполнении научно-исследовательских работ кафедры, в учебном процессе. Результаты исследований внедрены в ООО «ППП Дизельавтоматика», г. Саратов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методика обработки и анализа экспериментальных данных для экспресс-оценки возможностей повышения топливной экономичности и снижения токсичности ОГ газового двигателя грузового автомобиля при его работе на режимах малых нагрузок и холостого хода путём отключения части цилиндров.

2. Раздельный анализ выбросов неметановых ($NMHC$) и общих (THC) углеводородов при оценке показателей газового автомобильного двигателя при его работе на режимах малых нагрузок и холостого хода.

3. Результаты расчетных исследований показателей топливной экономичности и токсичности ОГ автомобильного газового двигателя при отключении цилиндров восьмицилиндрового двигателя на режимах малых нагрузок и холостого хода.

4. Стратегии отключения цилиндров восьмицилиндрового двигателя на режимах малых нагрузок и холостых ходов при реализации эксплуатационного ездового цикла городского автобуса.

Личный вклад соискателя Основные результаты диссертационной работы, методы и модели, выносимые на защиту, получены автором самостоятельно в ходе теоретических разработок и исследований.

Апробация работы:

Основные положения и результаты диссертации обсуждались:

- на заседаниях кафедры поршневых двигателей МГТУ им. Н.Э. Баумана. Москва, 2018;
- на семинарах кафедры теплотехники и тепловых двигателей инженерного факультета РУДН. Москва, 2016;
- на семинаре департамента машиностроения и приборостроения инженерной академии РУДН. Москва, 2017;
- на научно-технических конференциях инженерного факультета РУДН. Москва, 2015 и 2016;
- на Международной научно-технической конференции «Двигатель-2018», посвященной 150-летию факультета энергомашиностроения, МГТУ им. Н.Э. Баумана. Москва, 2018;
- на Всероссийской научно-технической конференции им. проф. В.И. Крутова в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Москва, 2017 и 2018;
- на Международной научно-технической конференции ASTRU-2018 в Уральском федеральном университете им. Б.Н. Ельцина. Екатеринбург, 2018.

Публикации По теме диссертации опубликовано 7 научных статей (все статьи в изданиях, включенных в перечень ВАК РФ рецензируемых ведущих научных журналов). Общий объем работ – 1,95 п.л. Также по теме диссертации опубликовано 4 тезиса докладов на конференциях.

Структура и объем работы Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы и приложения. Общий объем работы 159 страниц, включая 102 страницы основного текста, содержащего 65 рисунков, 24 таблицы. Список литературы включает 177 наименований. Приложение содержит материалы расчетных исследований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы разработки методов повышения энергоэффективности и экологичности газовых двигателей, длительное время работающих в условиях малых нагрузок. Дана общая характеристика диссертационной работы.

В первой главе диссертации проведен обзор работ, направленных на решение рассматриваемой проблемы. Вопросам разработки и исследования методов и средств организации рабочих процессов ДВС, работающих на режимах малых нагрузок, а также вопросам их регулирования методами отключения-включения цилиндров или циклов, посвящены работы В.Н. Балабина, Л.Н. Голубкова, Л.В. Грехова, С.Н. Девянина, Г.Д. Драгунова, А.Б. Зиняева, Г.Н. Злотина, В.И. Ерохова, Р.З. Кавтарадзе, А.Р. Кульчицкого, В.А. Маркова, И.Ю. Олесова, Г.Л. Островского, Н.Н. Патрахальцева, А.Э. Симсона, В.М. Славуцкого, А.З. Филиппова, А.С. Хачияна, Е.В. Шатрова и др. Этими проблемами занимались Peters G.F., Toyooki Fukui, Uday Sanapadi, Nester T.M. и др. При этом рассмотрены двигатели работающие как на нефтяном дизельном топливе, так и на альтернативных топливах.

Показано, что истощение запасов нефти и ухудшающаяся экологическая ситуация в крупных городах приводит к необходимости адаптации ДВС к работе на нетрадиционных (альтернативных) топливах. Обоснована необходимость использования природного газа в качестве моторного топлива для решения указанных проблем. Отмечено, что современные газовые двигатели достигли значительного совершенства в части их топливной экономичности, высокой надёжности и долговечности. При этом режимы малых нагрузок таких двигателей оказываются значительно менее экономичными, чем аналогичные режимы ДВС, работающих на традиционных видах топлива. Для снижения выбросов токсичных компонентов ОГ использование природного газа в ДВС необходимо сочетать с применением систем управления и регулирования, в частности – системы регулирования отключения цилиндров или циклов. Поиск рациональных алгоритмов такого регулирования целесообразно вести с применением математического моделирования, в том числе с целью экспресс-оценки эффективности предлагаемого метода, с последующим экспериментальным уточнением предлагаемых решений. При этом практическая реализация метода отключения цилиндров двигателя на режимах с неполной нагрузкой и перевода остальных цилиндров на режимы с повышенной нагрузкой достаточно подробно описана другими авторами и в представленной работе не рассматривается. По результатам обзора и анализа опубликованных работ сформулированы цель и следующие задачи исследования:

1. Проведение анализа возможностей повышения показателей экономичности и экологичности газового двигателя КАМАЗ RGK.ЕС.820 на режимах малых нагрузок путём отключения части его цилиндров.

2. Разработка расчётно-экспериментальной методики обработки и анализа экспериментальных данных с целью экспресс-оценки возможностей повышения экономичности и снижения токсичности ОГ газового двигателя при работе на режимах малых нагрузок путём отключения части его цилиндров с использованием различных вариантов реализации метода.

3. Проведение численных экспериментов по анализу возможных вариантов работы газового двигателя КАМАЗ RGK.ЕС.820 при отключении части его цилиндров в разных условиях эксплуатации.

4. Определение конкретных численных значений возможной экономии топлива и снижений токсичности ОГ газового двигателя КАМАЗ RGK.ЕС.820 при отключении части цилиндров в разных условиях эксплуатации по показателям среднеэксплуатационных нагрузок.

Во второй главе проведён анализ возможности и целесообразности применения природного газа в качестве топлива для транспортных ДВС. Отмечено, что ПГ может обеспечить минимальные выбросы CO_2 , более высокие мощности, чем биогаз или синтез-газ, но несколько более низкие, чем бензин и пропан при более низких удельных эффективных расходах, более низких выбросах NO_x . В связи с особенностями условий эксплуатации транспортных газовых ДВС обоснована целесообразность применения метода регулирования газового ДВС изменением его активного рабочего объёма, путём отключения части цилиндров. Обоснована применимость метода регулирования газового двигателя отключением части цилиндров, благодаря наличию приводных нагнетателей с регулированием воздухообеспечения, также благодаря применению двух и более турбокомпрессоров, что позволяет облегчить возможность отключения, как блока цилиндров V-образного двигателя, так и отдельных цилиндров. Разработана методика экспресс-анализа возможностей повышения экономичности и снижения токсичности газового ДВС регулированием его активного рабочего объёма. Существо методики заключается в следующем.

Анализ возможностей повышения экономичности (а также снижения токсичности, дымности и т.д.) двигателя путём деактивации (выключения) части цилиндров проводится сравнением показателей полноразмерного двигателя (ПР), работающего при данной малой нагрузке (МН) и данном скоростном режиме, и двигателя с отключением цилиндров (ОЦ), работающего на тех же режимах. Иными словами,

$$N_e^{ПР} = N_e^{ОЦ}, \quad M_e^{ПР} = M_e^{ОЦ}, \quad L_e^{ПР} = L_e^{ОЦ}.$$

Применить для такого анализа показатель среднего эффективного давления, строго говоря, нельзя. Для полноразмерного двигателя $p_e^{ПР} = L_e^{ПР}/(i \cdot V_h)$. Для одного цилиндра полноразмерного двигателя $p_e^{ПР} = (L_e^{ПР}/i)/V_h$. Т.е. средние эффективные давления одного цилиндра и всего двигателя на данном режиме равны. (Здесь $L_e^{ПР}/i$ – доля полной работы двигателя, выполняемая одним из его i цилиндров). Конструктивным показателем (параметром, признаком) цилиндра является его рабочий объём $V_h = (\pi \cdot D^2 \cdot S)/4$. Конструктивный показатель двигателя

– его полный рабочий объём $i \cdot V_h$. У двигателя с отключением части цилиндров число активных (не выключенных) цилиндров равно $z < i$. Причём, в наиболее общем случае $z = var$, так как двигатель регулируется изменением числа активных цилиндров. Строго говоря, число активных цилиндров z становится не конструктивным, а регулировочным параметром. При отключении части цилиндров подачи топлива в активные цилиндры возрастают (для поддержания исходного нагрузочного режима всего двигателя). Полная работа, выполняемая одним цилиндром, возрастает. В результате, среднее эффективное давление одного цилиндра, из числа активных, возрастает, поскольку конструктивный параметр V_h не изменился. В этих условиях целесообразно воспользоваться показателями удельной работы ($L_{уд}$), выполняемой каждым из двигателей. Для полноразмерного двигателя выполняемая им удельная работа составляет

$$L_{уд} = L_{полн.}/(i \cdot V_h) \text{ Дж/дм}^3, \quad (1)$$

где $i \cdot V_h$ – конструктивный показатель двигателя – его рабочий объём при общем числе цилиндров i и рабочем объёме одного цилиндра V_h .

Для двигателя с ОЦ при выполнении той же полной работы удельная работа составит

$$L_{уд}^{ОЦ} = L_{полн.}/(z \cdot V_h) \text{ Дж/дм}^3, \quad (2)$$

где z – число работающих (активных) цилиндров двигателя, а величина $z \cdot V_h$ – активный рабочий объём двигателя с ОЦ. Таким образом, регулирование двигателя отключением цилиндров представляет собой регулирование активного рабочего объёма двигателя и следовательно изменение удельной работы, выполняемой двигателем с ОЦ. При известности M_e полная работа, выполняемая полноразмерным двигателем (ПР), (а следовательно и двигателем с ОЦ на этом же режиме) равна

$$L_{полн.} = 2 \cdot \pi \cdot M_e \text{ Дж}. \quad (3)$$

А удельные работы составят соответственно:

$$L_{уд}^{ПР} = 2 \cdot \pi \cdot M_e / (i \cdot V_h) \text{ Дж/дм}^3, \quad (4)$$

$$L_{уд}^{ОЦ} = 2 \cdot \pi \cdot M_e / (z \cdot V_h) \text{ Дж/дм}^3. \quad (5)$$

Для того чтобы воспользоваться универсальной характеристикой исследуемого двигателя, необходимо ординату M_e заменить ординатой $L_{уд}$, как это показано на Рис. 1.

Приводимая расчётно-экспериментальная методика (математическая модель) применима при справедливости допущения, что абсолютные значения механических потерь в двигателях (M_m, N_m, L_m, p_m), как ПР, так и с ОЦ, не зависят от нагрузки, от числа активных цилиндров и т.д., а зависят только от частоты вращения вала двигателя. На рис. 1 звёздочками (8 ц., 4 ц.) показано, что при $n = 1200$ 1/мин полноразмерный двигатель (8 ц.) развивает $M_e = 200$ Н·м и, следовательно, $L_{уд}^{ПР} = 107$ Дж/дм³. Т.е. нагрузка составляет порядка 13% от уровня внешней скоростной характеристики (ВСХ). При этом удельный расход топлива составляет 370 г/(кВт·ч), и следовательно часовой расход равен 9,3 кг/ч. Если этот же нагрузочный и скоростной режим реализуется двигателем с ОЦ на четырёх активных цилиндрах (4 ц., т. е. $z = 4$), то удельная работа, выполняемая двигателем, составляет $L_{уд}^{ОЦ} = 214$ Дж/дм³. На характеристике стрелками показано, что в этом случае $g_e^{ОЦ}$ составит 265 г/(кВт·ч), $G_T^{ОЦ} = 6,7$ кг/ч, а ожидаемая

экономия топлива может составить 28% от уровня двигателя полноразмерного. На графике также показан пример реализации режима $n = 1600$ 1/мин при уровне малой нагрузки $M_e = 300$ Н·м (то есть 19 % от уровня ВСХ) и $L_{уд}^{ПП} = 160$ Дж/дм³. В этом случае $g_e^{ПП} = 300$ г/(кВт·ч), $G_T^{ПП} = 15,1$ кг/ч. Если тот же режим реализовать на четырёх цилиндрах, то $L_{уд}^{ПП} = 320$ Дж/дм³, $g_e^{ПП} = 233$ г/(кВт·ч), $G_T^{ПП} = 11,7$ кг/ч, а экономия топлива составит 22% от уровня расхода полноразмерного двигателя.

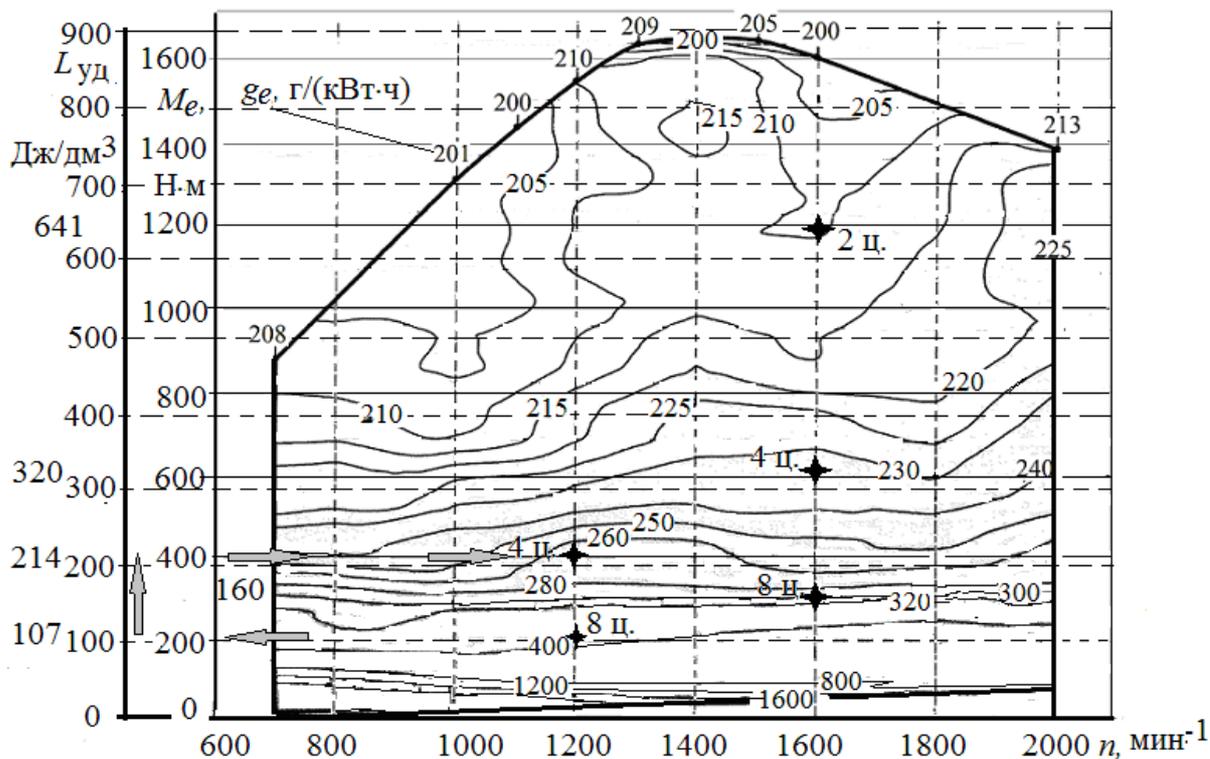


Рис. 1.

Экспериментально полученная универсальная (многопараметровая) характеристика газового двигателя КАМАЗ RGK.ЕС.820 (в координатах $M_e - n$), снабжённая ординатой удельной работы ($L_{уд}$), выполняемой двигателем (шкала с ординатой M_e применима для анализа регулирования двигателя полноразмерного, а шкала $L_{уд}$ — для обоих вариантов двигателей)

С использованием экспериментальной универсальной характеристики, содержащей параметрические кривые постоянных коэффициентов избытка воздуха ($\alpha = const$) в координатах $L_{уд} - n$, проведено уточнение положений расчётно-экспериментальной методики анализа изменений экономичности и экологичности режимов малой нагрузки при регулировании двигателя отключением части цилиндров. При анализе работы двигателя по 13-ти ступенчатому циклу показано, что рациональный состав горючей смеси в активных цилиндрах двигателя зависит от ступени режима и реализуемой двигателем удельной работы (Таблица 1).

Анализ результатов показывает, что при отключении части цилиндров (и следовательно повышении нагрузки на активные цилиндры) требуется не просто повышение расхода горючей смеси в эти цилиндры, но и определённое изменение состава смеси.

Таблица 1.

Показатели газового двигателя КАМАЗ, модель RGK.ЕС.820.61-260 по 13-ти ступенчатому циклу

№№ ступеней	n , мин ⁻¹	$L_{уд}$, Дж/дм ³	$L'_{уд}$, Дж/дм ³	α (ПР)	α' (ОЦ)
1	800	53	107	1,28	1,3
2	1400	87	173	1,39	1,41
3	1400	216	433	1,42	1,42
7	800	53	107	1,28	1,30
10	2000	374	748	1,41	1,39
11	2000	187	374	1,405	1,41
12	2000	75	150	1,33	1,395
13	800	53	107	1,28	1,3

В третьей главе в качестве объекта исследования выбран газовый двигатель КАМАЗ, основные показатели которого приведены в Таблице 2. Топливная система двигателя – моновпрыск газа.

Таблица 2.

Показатели исследованного газового двигателя КАМАЗ, модель RGK.ЕС.820.61-260. Испытания 2014-16 гг, экологическое качество EURO-5

№№ п.п.	Показатели	Обозначение	Размерность	Значение КАМАЗ
1.	Эффективная мощность, номинальная	$N_{e.ном}$	кВт	279
2.	Крутящий момент, номинальный	$M_{e.ном}$	Нм	1400
3.	Крутящий момент, максимальный	$M_{e.max}$	Нм	1610
4.	Частота вращения, номинальная	$n_{ном}$	мин ⁻¹	2000
5.	Частота максимального момента	n_M	мин ⁻¹	1400
6.	Частота вращения, минимальная	n_{min}	мин ⁻¹	800
7.	Размерность	D/S	см/см	12/13
8.	Число цилиндров	I	-	8
9.	Рабочий объём двигателя	$i \cdot V_h$	дм ³	11,76
10.	Механический КПД, номинальный	$\eta_{м.ном}$	-	0,825
11.	Удельный эффективный расход топлива номинальный	$g_{e.ном}$	г/(кВт·ч)	213
12.	Удельный эффективный расход топлива минимальный	$g_{e.min}$	г/(кВт·ч)	200
13.	Коэффициент избытка воздуха, номинальный	$\alpha_{ном}$	-	1,39
14.	Степень сжатия	E	-	12

Состав смеси в камере сгорания обеспечивается регулятором непрерывного потока газа CFV, управляемым программным обеспечением двигателя. CFV

(Continuous Flow Valve) – запатентованная система топливоподачи компании EControls, обеспечивающая соответствие газовых двигателей экологическому классу «Евро-5». Подача газа осуществляется через смеситель во впускной патрубке перед дроссельной заслонкой. Двигатель оборудован системами, состоящими из элементов *E-Controls*.

Краткие сравнительные характеристики газовых двигателей 8ЧН12/13, соответствующих нормам «Евро-5», представлены в Таблице 3.

Таблица 3.

Сравнительные характеристики газовых двигателей КАМАЗ-820.61.60 и RGK.EC.820.979-380

Модель двигателя	КАМАЗ-820.61.60	RGK.EC.820.979-380
Расположение и число цилиндров	V-8	
Диаметр цилиндра * ход поршня, мм	120 * 130	
Рабочий объём, л	11,76	
Степень сжатия	12,0±0,4	
Максимальная полезная мощность по Правилам ЕЭК ООН №85-00, номинальная мощность нетто по ГОСТ 14846-81, л.с.	260	380
Номинальная частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	2200±50	2000±50
Максимальный полезный крутящий момент по Правилам ЕЭК ООН №85-00, номинальная мощность нетто по ГОСТ 14846-81, Н*м	1150	1600
Частота вращения коленчатого вала, соответствующая максимальному крутящему моменту, мин ⁻¹	1400±100	1400±200
Минимальный удельный расход газа (по внешней скоростной характеристике), г/(кВт*ч)	209	200

Дано обоснование и проведён выбор характерных режимов работы газового двигателя в разных условиях эксплуатации: 13-ти ступенчатые циклы и статистически достоверный цикл работы городского автобуса, отличающиеся степенью загрузки (использования мощности). Оценено распределение режимов, с целью дальнейшего выполнения расчётно-экспериментального исследования. Удельный эффективный среднецикловой расход топлива (при реализации, например, 13-ти ступенчатого цикла) определяется уравнением

$$g_{e.u} = \left[\sum_{j=1}^{13} (G_{Tj} \cdot K_j) \right] / \left[\sum_{j=1}^{13} (N_{ej} \cdot K_j) \right] \text{ (кг/(кВт·ч)),} \quad (6)$$

где G_{Tj} , N_{ej} и K_j – соответственно, часовой расход топлива, эффективная мощность и коэффициент весомости режима $j^{\text{той}}$ ступени цикла. Аналогичные показатели применены для эксплуатационного цикла работы двигателя автобуса, когда число ступеней (зон) $j = 58$. Изменения удельных показателей расхода топлива, выбросов CO и т.д. при применении отключения цилиндров (ОЦ) по сравнению с показателями двигателя полноразмерного (ПР) определяются по соотношениям:

$$\Delta g_e = ((g_e^{\text{ПР}} - g_e^{\text{ОЦ}}) / g_e^{\text{ПР}}) \cdot 100\%. \quad (7)$$

$$\Delta g_{CO} = ((g_{CO}^{\text{ПР}} - g_{CO}^{\text{ОЦ}}) / g_{CO}^{\text{ПР}}) \cdot 100\%. \quad (8)$$

Проведена оценка погрешностей расчётно-экспериментального анализа математического моделирования) (Таблица 4). Выполнена проверка адекватности методики оценки экономичности двигателя с помощью универсальных характеристик.

Таблица 4.

Сравнение расчётных и экспериментальных показателей повышения экономичности двигателя BMW M60B40

Me	n	L полн.	L уд. 8ц	L уд. 4ц	g_e , расч.8ц	g_e , расч.4ц	g_e ,4ц, эсп.	Δg_e , расч.	Δg_e , Зксп
50	1250	314	62	125	740	410	500	44	32
100	2625	628	125	249	420	320	360	24	14
150	3630	942	187	374	360	290	330	19	9

Выполнена оценка погрешностей выполняемых далее расчётных исследований. Показано, что используемые в работе опубликованные другими авторами результаты экспериментальных исследований могут обеспечить получение достаточно точных количественных показателей, что в значительной мере определяется проведением сравнительных анализов.

В четвёртой главе проведено математическое моделирование влияния изменения числа активных цилиндров газового двигателя КАМАЗ на относительную экономию топлива при режимах малых нагрузок разного уровня при допущении 100% времени работы на данном режиме. На Рис.2–4 показаны примеры обработки информации для заданных уровней малой нагрузки при заданных частотах вращения вала.

Проведена оценка возможного снижения среднеэксплуатационного расхода топлива газового двигателя КАМАЗ RGK.ЕС.820 при реализации нестандартного 13-ти ступенчатого испытательного цикла с коэффициентом загрузки по мощности $K_b = 0,37$, а также возможного снижения среднеэксплуатационного расхода топлива газовым двигателем КАМАЗ RGK.ЕС.820 при реализации эксплуатационного ездового цикла городского автобуса с коэффициентом загрузки по мощности $K_b = 0,234$.

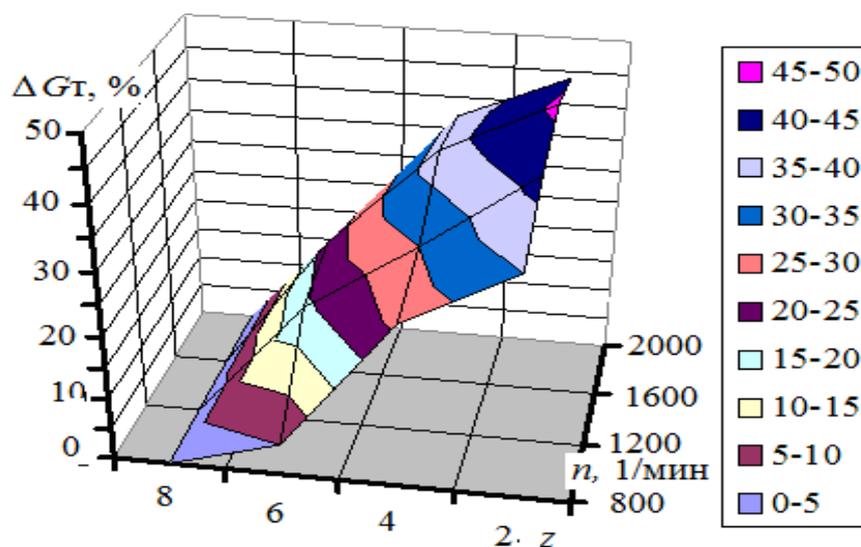


Рис. 2.

Возможности повышения экономичности (ΔG_T) газового двигателя КАМАЗ в зависимости от числа активных цилиндров z и частоты вращения вала n при исходном режиме малой нагрузки $M_e=200$ Н·м (доля малой нагрузки при частотах 800, 1200, 1600 и 2000: 20; 12,9; 12,5; 14,3%% от ВСХ)

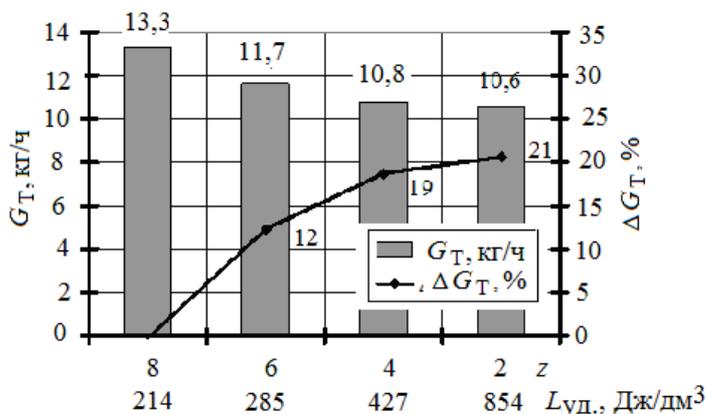


Рис. 3.

Влияние числа активных цилиндров z (и, соответственно, удельной работы $L_{уд}$, выполняемой двигателем на данном режиме) на часовой расход (G_T) и экономии топлива (ΔG_T) при режиме нагрузки $M_e = 400$ Н·м, то есть ~ 26 % от уровня ВСХ при $n = 1200$ 1/мин

Приведены примеры обработки информации по 58 точкам достоверного эксплуатационного цикла двигателя городского автобуса в условиях интенсивного городского движения. Выполнен анализ возможностей повышения экологических качеств газового двигателя КАМАЗ RGK.EC.820 при реализации нестандартного 13-ти ступенчатого испытательного цикла и оценка влияния активного рабочего объёма газового двигателя КАМАЗ RGK.EC.820, работающего по нестандартному 13-ти ступенчатому испытательному циклу, на выбросы CO, на выбросы общих и неметановых углеводородов и оксидов азота. Выполнены сравнения результатов по двигателю в разных исполнениях. Проведён анализ возможностей повышения экологических качеств газового двигателя КАМАЗ RGK.EC.820 при реализации типичного эксплуатационного цикла городского автобуса.

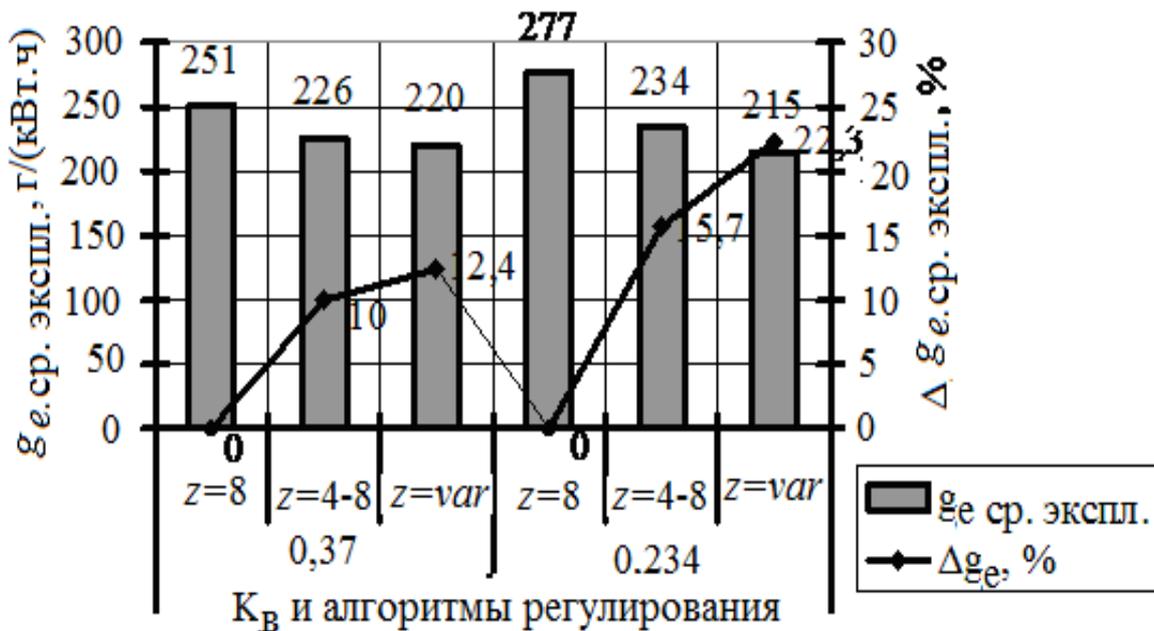


Рис. 4.

Влияние коэффициента загрузки по мощности (K_b) газового двигателя КАМАЗ RGK.ЕС.820 на удельный эффективный среднеэксплуатационный расход топлива (за цикл эксплуатации) при разных алгоритмах регулирования: $K_b=0,37$ – нестандартный 13-ти ступенчатый цикл; $K_b=0,234$ – цикл эксплуатации городского автобуса

Суммарный выброс неметановых углеводородов $NMHC$ при реализации 13-ти ступенчатого цикла полноразмерным двигателем составил $\sum_1^{13} G_{NMHC} = 1,56$ кг.

Средний за цикл часовой выброс $NMHC$ составил $G_{NMHC,ср.ц} = 1,56/13 = 0,12$ кг/ч. А удельный выброс $NMHC$ ПР двигателем составил $g_{NMHC,ср.ц} = 1,11$ г/(кВт·ч). Суммарный выброс $NMHC$ при реализации цикла при регулировании двигателя

(с ОЦ) по алгоритму $z=4-8$ составил $\sum_1^{13} G'_{NMHC} = 1,2114$ кг. Средний за цикл часовой выброс $NMHC$ составил $G'_{NMHC,ср.ц} = 1,2114/13 = 0,093$ кг/ч. А удельный выброс $NMHC$ составил $g'_{NMHC,ср.ц} = 0,861$ г/(кВт·ч).

Выявлено влияние активного рабочего объема газового двигателя КАМАЗ RGK.ЕС.820, работающего по 13-ти ступенчатому циклу, на выбросы общих углеводородов (THC)

Проведён анализ влияния на выбросы NO_x регулирования активного рабочего объема газового двигателя КАМАЗ RGK.ЕС.820 при реализации 13-ти ступенчатого цикла. При этом выполнено сравнение результатов по двигателю в разных исполнениях: ПР – полноразмерного и с ОЦ – отключением цилиндров. Проведён анализ возможностей повышения экологических качеств газового двигателя КАМАЗ RGK.ЕС.820 при реализации типичного эксплуатационного цикла городского автобуса.

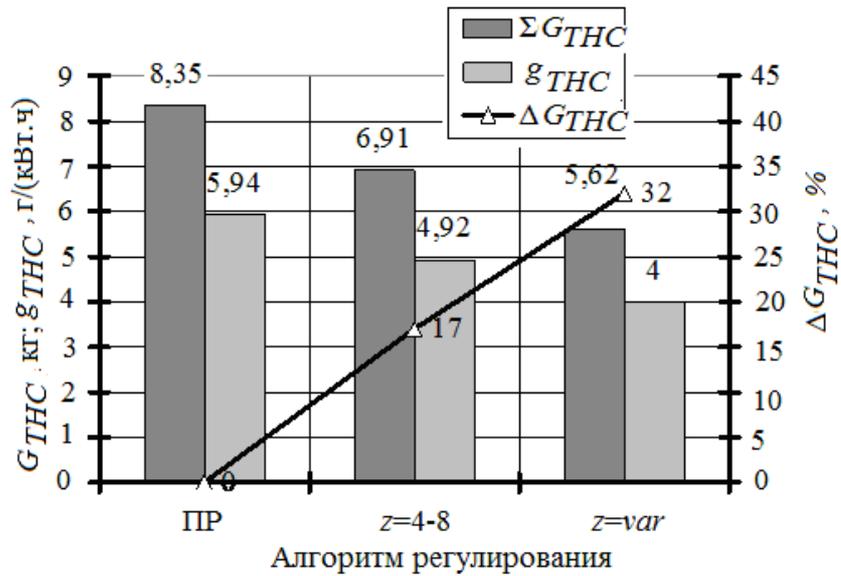


Рис. 5.

Влияние алгоритма метода регулирования газового двигателя КАМАЗ RGK.ЕС.820 на выбросы суммарных углеводородов (THC)

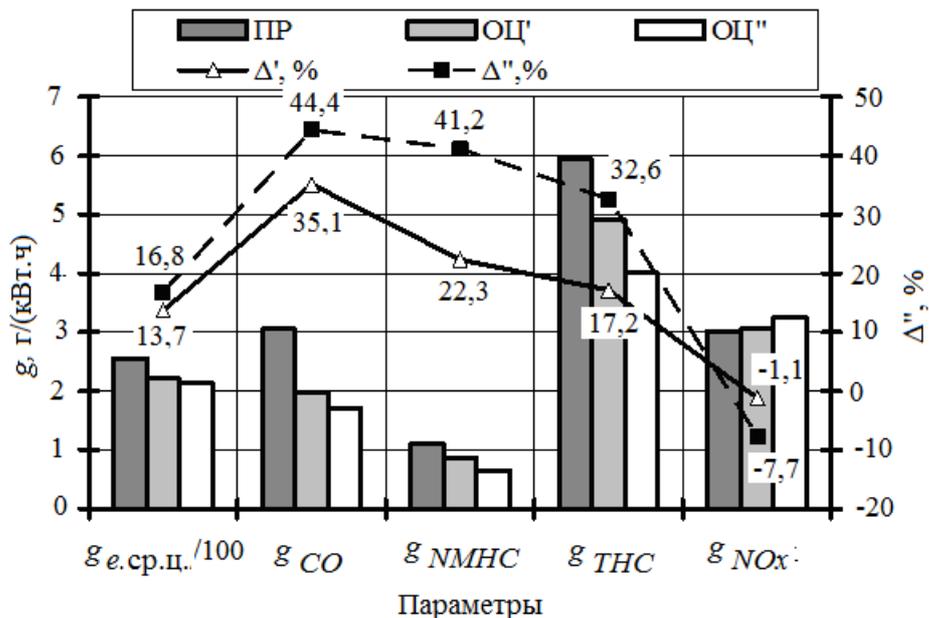


Рис. 6.

Сравнение относительных изменений средних, за время реализации 13-ти ступенчатого цикла, расходов топлива и выбросов вредных веществ при отключении четырёх цилиндров (Δ' , т.е. алгоритм регулирования $z=4-8$) и при отключении двух, четырёх, шести цилиндров, в зависимости от нагрузки (Δ'' , т.е. алгоритм регулирования $z=var$)

Далее на Рис. 8. показаны удельные расходы топлива ($g_{e.ср.ц./100}$) и удельные выбросы ВВ (g_{CO} , g_{THC} , g_{NMHC} , g_{NOx}), средние при реализации типичного ездового цикла городского автобуса, а также изменения показателей относительно полноразмерного двигателя (ПР) при отключении четырёх цилиндров (Δ') (алго-

ритм $z=4-8$) или изменяемого числа отключаемых цилиндров в зависимости от уровня текущей нагрузки (\prime) (алгоритм $z=var$).

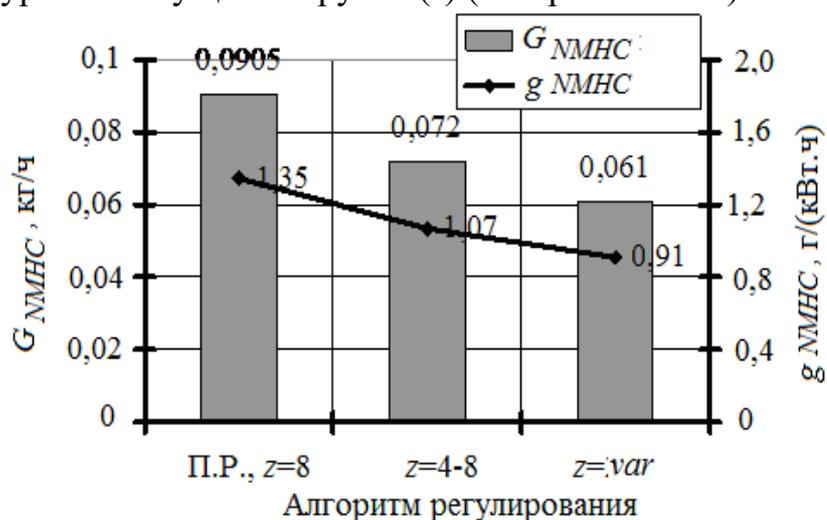
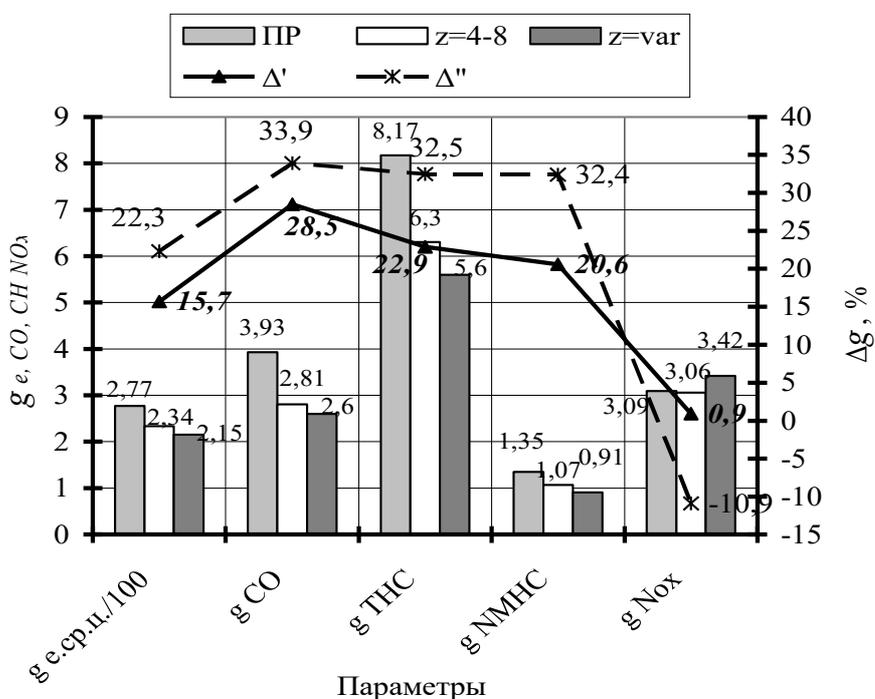


Рис. 7.
Влияние алгоритма регулирования газового двигателя КАМАЗ RGK.ЕС.820 на выбросы часовые (G_{NMHC}) и удельные (g_{NMHC}) неметановых углеводородов ($NMHC$) при реализации эксплуатационного цикла автобуса

Рис. 8.
Основные итоговые результаты.



ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

1. Проведён анализ возможностей повышения энергоэффективности и экологичности режимов малых нагрузок газового двигателя КАМАЗ RGK.ЕС.820 методом регулирования его активного рабочего объёма путём отключения подачи топлива в деактивируемые цилиндры.

2. Предложена методика обработки экспериментальных данных экспресс-оценки возможностей повышения экономичности и снижения токсичности двигателя. Она адаптирована применительно к газовому двигателю КАМАЗ RGK.ЕС.820. Расчёты проведены с использованием экспериментально полученных универсальных характеристик при работе на режимах малых нагрузок путём отключения части его цилиндров с использованием различных вариантов реализации метода регулирования.

3. Показано, что при непрерывной (100 % времени) работе на режимах малых нагрузок, например равной 10 % от уровня ВСХ, возможная экономия топлива достигает 66 % при 800 мин⁻¹, 45 % при 1200 мин⁻¹ и 20 % при номинальной частоте вращения от уровня расхода полноразмерным двигателем. При частоте вращения 1200 мин⁻¹ и уровне нагрузки 40 % экономия топлива в идеальном случае уже не превышает 5-7 % и 4-6 % при работе с числом активных цилиндров $z = 6$ и 4 соответственно.

4. Исследования показали, что при реализации двигателем средневзвешенного испытательного цикла отключением четырёх цилиндров (вариант регулирования $z=4-8$) можно ожидать экономии топлива до 13 % при отсутствии ограничений на реализацию режима. При этом снижения выбросов CO , неметановых и общих ($NMHC$ и THC) углеводородов могут достигать 35, 22 и 17 % соответственно. Однако выбросы NO_x в этих условиях остаются практически неизменными. При реализации более сложного варианта отключения цилиндров, зависящего от текущей нагрузки (вариант $z=var$), экономия топлива при работе двигателя по средневзвешенному испытательному циклу может составить до 17 %. При этом выбросы CO , $NMHC$ и THC могут снизиться на величины до 44, 41 и 33 % соответственно, а выбросы NO_x возрастают на величину до 8-10 %.

5. Показано, что при реализации двигателем эксплуатационного цикла городского автобуса можно применением варианта регулирования $z=4-8$ (т.е. отключением четырёх цилиндров из восьми) ожидать экономии топлива до 16% при отсутствии ограничений на реализацию метода. При этом выбросы CO , $NMHC$ и THC снижаются на величины до 28, 21 и 23 % соответственно при неизменных выбросах NO_x . При реализации варианта регулирования $z=var$ экономия топлива может составить до 22 %. Выбросы CO , $NMHC$ и THC снижаются на величины до 34, 32 и 33 % соответственно. При этом выбросы NO_x могут возрасти на величину до 11 %.

6. При отключении части цилиндров (и, следовательно, повышении нагрузки на активные цилиндры) требуется не просто повышение расхода горючей смеси в эти цилиндры, но и определённое изменение состава смеси. Причём, с увеличением расхода топлива для повышения нагрузки в данном активном цилиндре одновременно может требоваться некоторое обеднение горючей смеси (у дизеля при отключении части цилиндров всегда происходит обогащение смеси) или её обогащение. То есть должна быть проведена регулировка расхода воздуха, изменение его количества. Эти изменения в данном случае сравнительно невелики и могут обеспечиваться конструктивными возможностями двигателя.

Список работ, опубликованных по теме диссертации:

1. Патрахальцев Н.Н., Виноградов Л.В., Лотфуллин Ш.Р. Возможности повышения экономичности автобусного газового двигателя КАМАЗ регулированием его рабочего объёма // Грузовик. 2017. № 2. С. 18-23 (0,50 п.л. / 0,25 п.л.).

2. Патрахальцев Н.Н., Виноградов Л.В., Лотфуллин Ш.Р. Повышение экономичности газового двигателя КАМАЗ отключением части цилиндров на режимах малых нагрузок // Транспорт на альтернативном топливе. 2017. № 1. С. 31-35 (0,50 п.л. / 0,25 п.л.).
3. Патрахальцев Н.Н., Виноградов Л.В., Лотфуллин Ш.Р. Оценка возможности повышения экономичности и экологичности газового двигателя КАМАЗ регулированием его активного рабочего объема // Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо. 2017. Том 16, № 3. С. 99-104 (0,50 п.л. / 0,25 п.л.).
4. Патрахальцев Н.Н., Ощепков П.П., Лотфуллин Ш.Р. Снижение выбросов неметановых углеводородов с отработавшими газами газового двигателя изменением его активного рабочего объема // Транспорт на альтернативном топливе. 2017. № 5. С. 21-28 (0,60 п.л. / 0,30 п.л.).
5. Снижение выбросов неметановых углеводородов автобусным газовым двигателем типа КАМАЗ в условиях эксплуатации / Ш.Р.Лотфуллин [и др] // Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо. 2018. Том 17. № 3. С. 121-125 (0,50 п.л. / 0,25 п.л.).
6. Эксплуатационные показатели топливной экономичности и токсичности отработавших газов автомобильного газового двигателя / Ш.Р.Лотфуллин [и др] // Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо. 2018. Том 17, № 8. С. 350-364 (1,20 п.л. / 0,40 п.л.).
7. Марков В.А., Барченко Ф.Б., Лотфуллин Ш.Р. Метод улучшения эксплуатационных показателей автомобильного газового двигателя // Известия ВУЗов. Машиностроение. 2018. № 12. С. 38-44 (0,60 п.л. / 0,25 п.л.).
8. Патрахальцев Н.Н., Виноградов Л.В., Лотфуллин Ш.Р. Возможности повышения топливной экономичности автобусного газового двигателя типа КамАЗ регулированием его рабочего объема / Тезисы доклада всероссийской научно-технической конф. им. проф. В.И. Крутова // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, сер. Машиностроение. 2017. № 4. С.124 (0,30 п.л. / 0,15 п.л.).
9. Эксплуатационные показатели газового двигателя / Ш.Р.Лотфуллин [и др] // Материалы научно-технической конференции «Двигатель-2018», посвященной 150-летию факультета «Энергомашиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана. С. 144-155 (0,25 п.л. / 0,15 п.л.).
10. Барченко Ф.Б., Лотфуллин Ш.Р. Повышение эколого-экономических показателей газового монотопливного двигателя изменением его активного рабочего объема / Тезисы доклада всероссийской научно-технической конф. им. проф. В.И. Крутова // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, сер. Машиностроение. 2019. № 1. С.106 (0,30 п.л. / 0,15 п.л.).
11. Markov V.A., Barchenko F.B., Lotfullin Sh.R. Method of improving performance of automobile gas engine // Abstract book ASTRU-2018, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin (UrFU), Ekaterinburg, 2018. P. 65-67. (0,25 п.л. / 0,15 п.л.).