

# Энергетическое, металлургическое и химическое машиностроение

УДК 621.436

doi: 10.18698/0536-1044-2018-12-38-44

## Метод улучшения эксплуатационных показателей автомобильного газового двигателя

**В.А. Марков, Ф.Б. Барченко, Ш.Р. Лотфуллин**

МГТУ им. Н.Э. Баумана

## A Technique for Improving the Performance of a Gas Engine

**V.A. Markov, F.B. Barchenko, Sh.R. Lotfullin**

Bauman Moscow State Technical University

Актуальность статьи обусловлена необходимостью совершенствования показателей топливной экономичности и токсичности отработавших газов автомобильных двигателей внутреннего сгорания, работающих на альтернативных топливах. Отмечено, что одним из самых перспективных альтернативных топлив является природный газ. Приведены преимущества использования природного газа в качестве моторного топлива. Выполнен анализ проблем, возникающих при адаптации двигателей внутреннего сгорания к работе на природном газе. Рассмотрены показатели топливной экономичности и токсичности отработавших газов автомобильного газового двигателя семейства КамАЗ. Показано, что для достижения наилучших эксплуатационных показателей исследуемого автомобильного газового двигателя целесообразно обеспечить его работу в режимах с полной нагрузкой. Такое улучшение показателей топливной экономичности и токсичности отработавших газов двигателя может быть обеспечено отключением части цилиндров и работой остальных цилиндров в режимах с полной нагрузкой. Одновременно с реализацией метода отключения цилиндров необходимо применять метод снижения выбросов оксидов азота.

**Ключевые слова:** двигатель внутреннего сгорания, дизельный двигатель, газовый двигатель, природный газ, топливная экономичность, токсичность отработавших газов

This article is necessitated by the need to improve indicators of fuel efficiency and exhaust gas toxicity for internal combustion engines working on alternative fuels. It is noted that natural gas is one of the most promising alternative fuels, and its advantages as a motor fuel are described. Problems occurring when adapting internal combustion engines for operation on natural gas are analysed. Indicators of fuel efficiency and exhaust gas toxicity of a gas engine of the KamAZ family are studied. It is shown that to achieve the best operational indicators of the gas engine under consideration, it is advisable to ensure its operation in full load modes. This improvement of the fuel efficiency and exhaust gas toxicity can be achieved by deactivating some cylinders and operating the other cylinders in the full load mode. Nitrogen oxides emission should be reduced simultaneously with the application of the cylinder deactivation technique.

**Keywords:** internal combustion engine, diesel engine, gas engine, natural gas, fuel efficiency, of exhaust gases toxicity

Истощение мировых запасов нефти, нарастающий дефицит нефтепродуктов и повышение цен на традиционные моторные топлива (МТ) вынуждают двигателестроителей искать им замену. При этом важнейшими факторами выбора того или иного альтернативного МТ для двигателей внутреннего сгорания являются обширность сырьевой базы для их получения и стоимость энергоносителя [1, 2]. Другой причиной интенсивных поисков альтернативных МТ служит ужесточение требований к токсичности отработавших газов (ОГ) двигателей [3, 4].

Благодаря большим запасам и невысокой стоимости природный газ относится к наиболее перспективному альтернативным МТ. По сравнению с традиционными нефтяными топливами он более экологичен [3, 4]. Это обусловлено легким фракционным составом природного газа, содержащего в основном метан, и отсутствием в нем полициклических ароматических углеводородов и серы, которые имеются в жидких нефтяных топливах.

Несмотря на указанные достоинства природного газа, его повсеместного широкого использования как МТ пока не происходит, что объясняется целым комплексом причин. Одной из проблем, возникающих при адаптации двигателей к работе на природном газе, является его плохая воспламеняемость в камере сгорания. В связи с этим разработаны различные способы организации рабочего процесса двигателей, переводимых на газомоторное топливо. Реализованы газовый, газодизельный и другие рабочие процессы [1, 5, 6]. Широкое применение природного газа как МТ сдерживается недостаточно развитой сетью автомобильных газонаполнительных компрессорных станций.

**Режимы работы двигателей и их эксплуатационные показатели.** Для оценки эффективности использования природного газа как МТ необходимо более подробно проанализировать эксплуатационные показатели топливной экономичности и токсичности ОГ автомобильных двигателей. Эти показатели в значительной степени определяются распределением режимов их работы, которые, в свою очередь, весьма разнообразны и зависят от характера эксплуатации транспортного средства и других факторов.

На рис. 1 показано типичное поле распределения режимов работы дизельного двигателя КамАЗ-740 (установленного на полностью загруженный грузовой автомобиль КамАЗ-5320 общей массой 16 т), полученное в условиях интенсивного городского движения [7]. В каждой подобласти этого поля указано относительное время работы дизеля в процентах.

Основную часть времени (62 %) дизельный двигатель функционирует в диапазоне частот вращения коленчатого вала  $n = (0,48 \dots 0,67) n_{ном}$ . В области номинальной частоты вращения коленчатого вала  $n_{ном}$  продолжительность его работы составляет 2,5 % общего времени эксплуатации, в режиме максимальной мощности — примерно 0,4 %, в режимах с полной нагрузкой (в режимах внешней скоростной характеристики с максимальным крутящим моментом двигателя  $M_e$ ) — около 30 %. Каждый эксплуатационный режим имеет свою специфику и отличается от других по показателям топливной экономичности и токсичности ОГ дизеля.

Опубликованные данные (например, в работах [8–10]) по характеристикам двигателей, работающих на дизельном и альтернативных топливах, и методики оценки их экологической безопасности не позволяют однозначно определить наиболее предпочтительные альтернативные МТ, так как эффективность их использования необходимо оценивать по целому комплексу показателей токсичности ОГ и топливной экономичности.

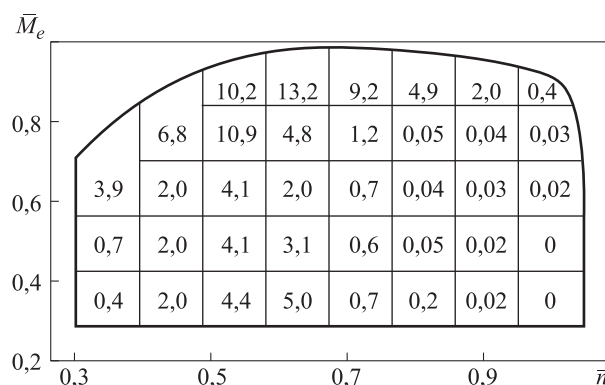


Рис. 1. Поле распределения режимов работы дизеля КамАЗ-740 грузового автомобиля КамАЗ-5320 в условиях интенсивного городского движения:  
 $\bar{n}$  — относительная частота вращения коленчатого вала;  
 $\bar{M}_e$  — относительный крутящий момент двигателя

Цель работы — исследование экологических показателей двигателей внутреннего сгорания, использующих природный газ в качестве МТ, и целесообразных направлений совершенствования этих показателей.

**Эксплуатационные показатели газового двигателя (ГД).** Для достижения поставленной цели использованы экспериментальные показатели, полученные при испытании ГД RGK.EC.820, в котором воспламенение природного газа в камере сгорания происходит от свечи зажигания. Результаты этих испытаний, проведенных при участии Ш.Р. Лотфуллина, приведены в работах [11, 12]. В двигателе RGK.EC.820B, разработанном на базе дизеля семейства КамАЗ, применена система центральной подачи газа с электронным управлением компании EControls (США).

Для получения необходимых показателей проведена доработка штатных узлов дизеля КамАЗ. Полностью изменен впускной тракт двигателя. Электронные системы управления работой турбокомпрессоров и контроля подачи воздуха и газа с обратной связью по показаниям широкополосного датчика кислорода поддерживают качественную работу ГД на всех режимах в течение длительного периода эксплуатации. Система управления ГД исключает детонационные процессы, которые могут проявляться при эксплуатации под нагрузкой и с высокими температурами, предотвращая аварийные разрушения.

Рассмотренный двигатель RGK.EC.820 с турбонаддувом и номинальной мощностью 290 кВт,

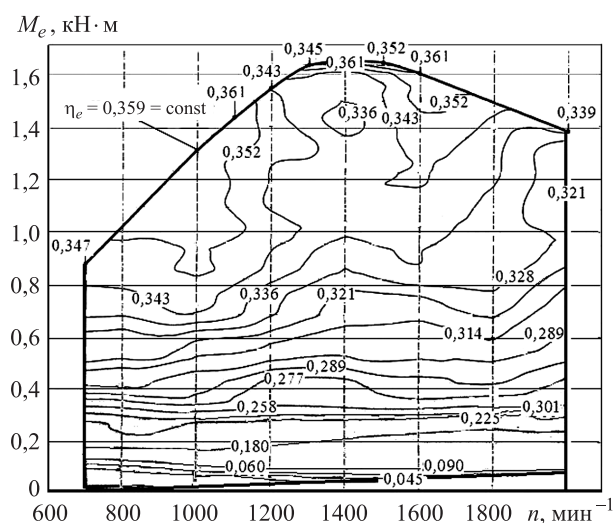


Рис. 2. Многопараметровая характеристика ГД RGK.EC.820 по эффективному КПД  $\eta_e$

работающий на природном газе, сертифицированный на полигоне ФГУП «НАМИ», соответствует нормам токсичности ОГ Euro 5 (сертификат ТС RU C-RU.MT25.B.02992). Универсальные (многопараметровые) характеристики ГД RGK.EC.820 по эффективному коэффициенту полезного действия (КПД)  $\eta_e$  и удельным массовым выбросам токсичных компонентов приведены на рис. 2 и 3. Следует отметить, что для снижения тепловой напряженности деталей камеры сгорания ГД в нем организован процесс сгорания бедной смеси. Распределение коэффициента избытка воздуха для различных скоростных и нагрузочных режимов работы двигателя приведено на рис. 4.

Согласно рис. 2 и 3, наилучшие показатели топливной экономичности и токсичности ОГ исследуемого двигателя соответствуют режимам с полной нагрузкой. Также следует отметить, сравнительно небольшой выброс оксидов азота  $\text{NO}_x$  и значительные выбросы неметановых углеводородов NMСН и двух других нормируемых токсичных компонентов ОГ — монооксида углерода СО и суммарных несгоревших углеводородов  $\text{СН}_x$ .

**Метод улучшения эксплуатационных показателей ГД.** Анализ данных рис. 2 и 3 показывает, что перевод рассматриваемого ГД в режимы с улучшенными показателями топливной экономичности и токсичности ОГ является эффективным средством повышения его эксплуатационных параметров. Это может быть достигнуто переводом двигателя в экономичные и экологичные режимы работы путем отключения части цилиндров с использованием систем автоматического регулирования и управления [7, 13, 14]. Причем в режимах с частичной нагрузкой одна часть цилиндров отключается, а другая функционирует в режимах с полной нагрузкой, имеющих улучшенные показатели топливной экономичности и токсичности ОГ.

Для подтверждения эффективности такой организации работы ГД RGK.EC.820 был проведен анализ его многопараметровых характеристик (см. рис. 2 и 3) по следующей методике. Рассмотрены фиксированные скоростные режимы работы ГД в диапазоне частот вращения коленчатого вала от номинальной  $n = n_{\text{ном}}$  ( $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ ) до минимальной  $n = 0,4n_{\text{ном}}$  ( $n = 800 \text{ мин}^{-1}$ ). Для каждого из скоростных режимов получены нагрузочные характеристики. При этом исследованы режимы от пол-

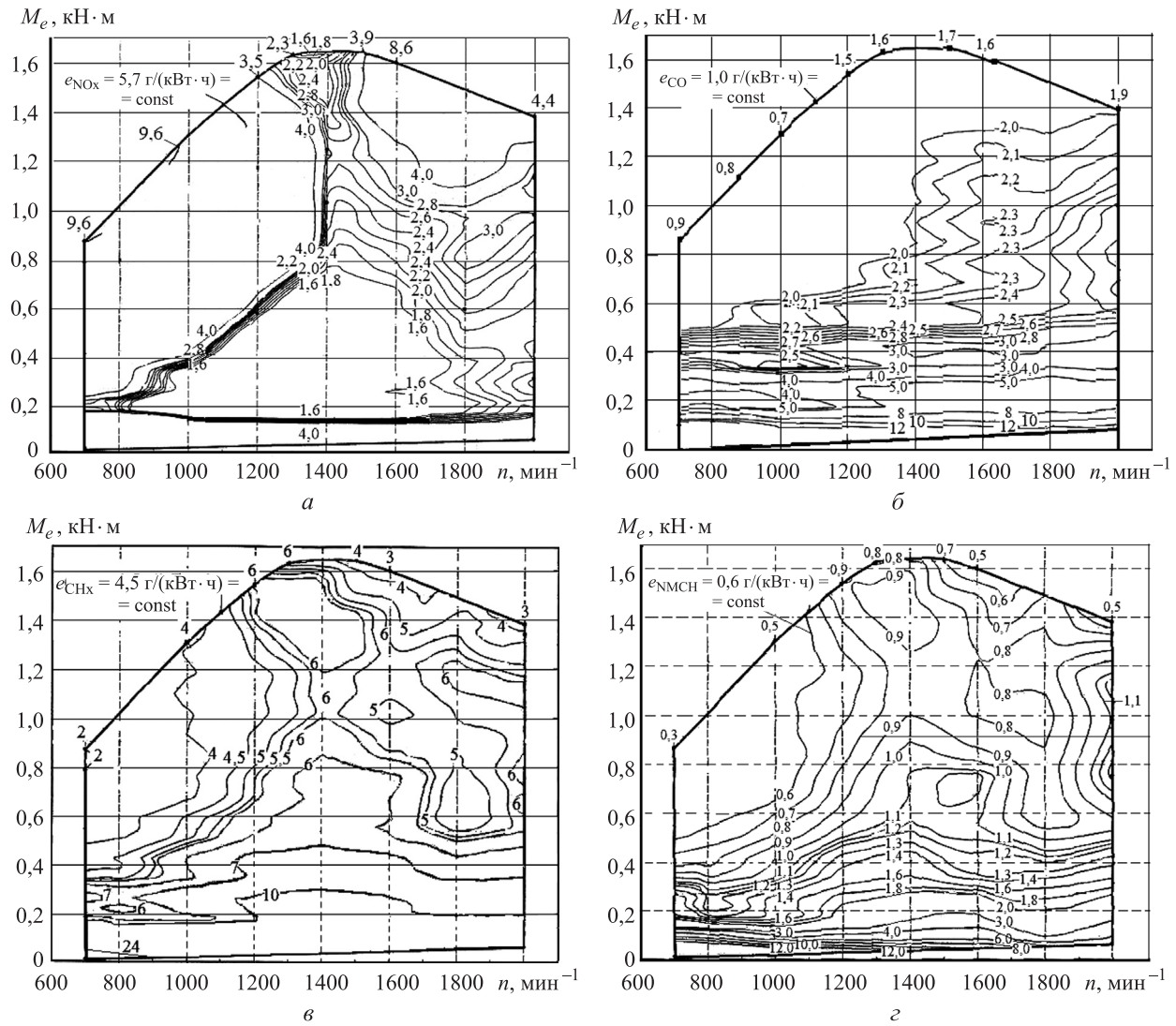


Рис. 3. Многопараметровые характеристики ГД RGK.ЕС.820 по удельным массовым выбросам оксидов азота  $e_{NOx}$  (а), монооксида углерода  $e_{CO}$  (б), суммарных углеводородов  $e_{CHx}$  (в) и неметановых углеводородов  $e_{NMCH}$  (г)

ной нагрузки (с относительным крутящим моментом двигателя  $\bar{M}_e \text{ полн} = 1$ ) до частичной ( $\bar{M}_e = 0,3\bar{M}_e \text{ полн}$ ). Полученные данные приведены на рис. 5 и 6.

Результаты проведенного анализа подтверждают эффективность применения метода отключения части цилиндров в режимах с неполной нагрузкой для снижения расхода топлива и выбросов токсичных компонентов ОГ. На рис. 5 и 6 наблюдается ярко выраженная тенденция к увеличению эффективного КПД двигателя  $\eta_e$  и уменьшению удельных массовых выбросов монооксида углерода  $e_{CO}$ , суммарных несгоревших углеводородов  $e_{CHx}$  и неметановых углеводородов  $e_{NMCH}$  при возрастании нагрузки. В частности, в номинальном скоростном режиме ( $n = 2000$  мин<sup>-1</sup>) повышение относительного крутящего момента двигателя  $\bar{M}_e$  от 0,3 до 1,0

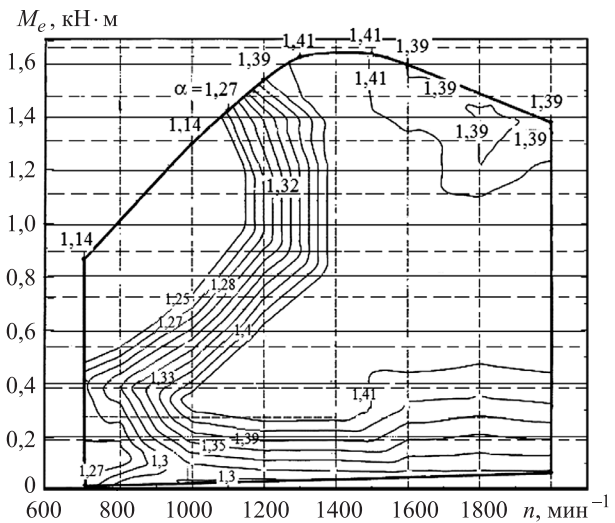


Рис. 4. Многопараметровая характеристика ГД RGK.ЕС.820 по коэффициенту избытка воздуха  $\alpha$

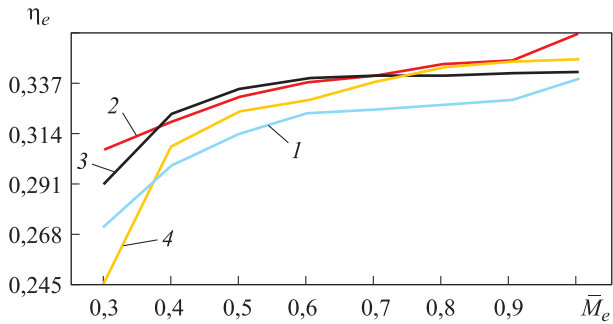


Рис. 5. Зависимость эффективного КПД  $\eta_e$  двигателя RGK.ЕС.820 от скоростного и нагрузочного режимов его работы:

1 —  $n = n_{\text{ном}}$ ; 2 —  $n = 0,8n_{\text{ном}}$ ; 3 —  $n = 0,6n_{\text{ном}}$ ; 4 —  $n = 0,4n_{\text{ном}}$

(см. рис. 5, 6) сопровождается ростом эффективного КПД  $\eta_e$  от 0,272 до 0,339 и уменьшением удельных массовых выбросов, г/(кВт·ч):  $e_{\text{CO}}$  — от 3,4 до 1,9,  $e_{\text{CH}_x}$  — от 6,6 до 3,0,  $e_{\text{NMCH}}$  — от 1,3 до 0,5. Следовательно при снижении нагрузки ( $\bar{M}_e$ ) на ГД целесообразно сократить число функционирующих цилиндров так, чтобы остальные работали с полной нагрузкой ( $\bar{M}_e = 1$ ).

Следует отметить, что при  $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$  и повышении относительного крутящего момента двигателя  $\bar{M}_e$  от 0,3 до 1,0 выбросы оксидов азота  $e_{\text{NO}_x}$  увеличиваются с 2,0 до 4,4 г/(кВт·ч). Поэтому одновременно с реализацией метода

отключения цилиндров необходимо применять метод снижения выбросов оксидов азота.

Анализ многопараметровых характеристик ГД RGK.ЕС.820 по эффективному КПД  $\eta_e$  и выбросам токсичных компонентов  $e_{\text{NO}_x}$ ,  $e_{\text{CO}}$ ,  $e_{\text{CH}_x}$  и  $e_{\text{NMCH}}$  показывает эффективность метода отключения цилиндров двигателя в режимах с неполной нагрузкой. Практическая реализация метода отключения цилиндров двигателя в режимах с неполной нагрузкой и переводом остальных цилиндров в режим с полной нагрузкой достаточно подробно описана в работах [13–15].

Результаты проведенных исследований подтвердили существенную зависимость эксплуатационных показателей автомобильного двигателя от режимов его работы, а также эффективность улучшения его топливной экономичности и токсичности ОГ применением природного газа в качестве газомоторного топлива с одновременной реализацией метода отключения части цилиндров в режимах с неполной нагрузкой.

## Выводы

1. Доля режимов с полной нагрузкой автомобильного ГД, работавшего в условиях интенсивного городского движения, составила около 30 % общего времени эксплуатации.

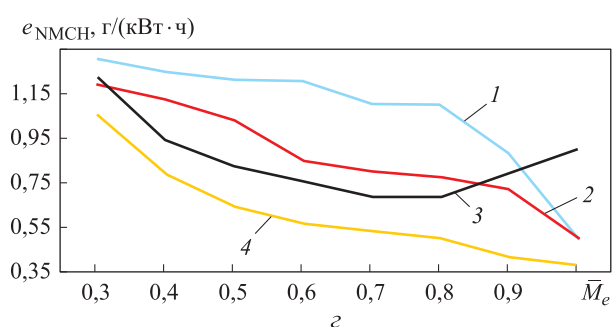
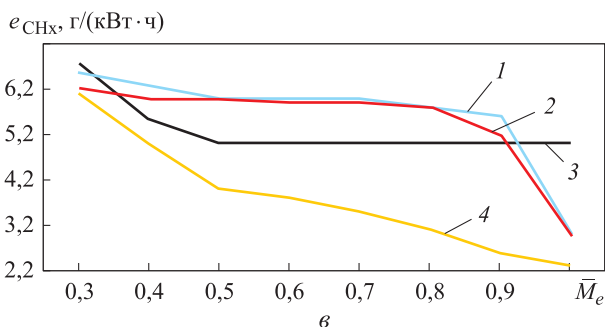
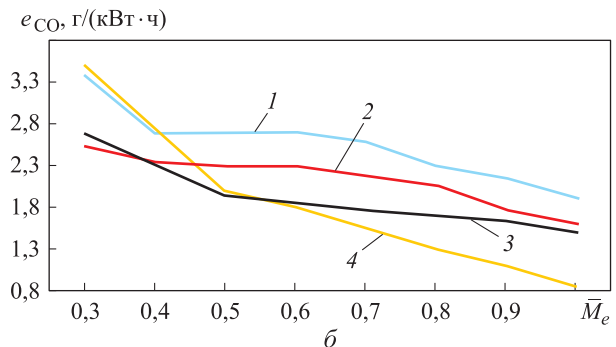
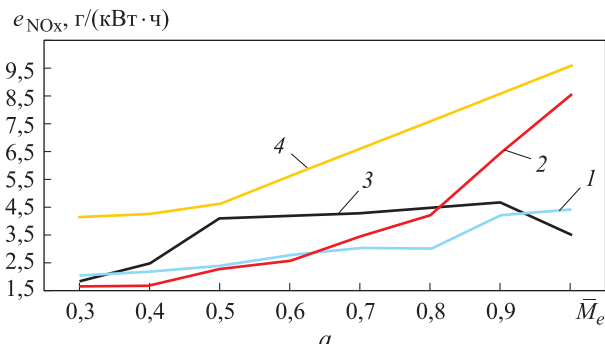


Рис. 6. Зависимости удельного массового выброса оксидов азота  $e_{\text{NO}_x}$  (а), монооксида углерода  $e_{\text{CO}}$  (б), суммарных несгоревших углеводородов  $e_{\text{CH}_x}$  (в) и неметановых углеводородов  $e_{\text{NMCH}}$  (г) с ОГ двигателя RGK.ЕС.820 от скоростного и нагрузочного режимов его работы:

1 —  $n = n_{\text{ном}}$ ; 2 —  $n = 0,8n_{\text{ном}}$ ; 3 —  $n = 0,6n_{\text{ном}}$ ; 4 —  $n = 0,4n_{\text{ном}}$

2. Для получения наилучших эксплуатационных показателей ОГ ГД целесообразно обеспечить его работу на режимах с полной нагрузкой.

3. Такое улучшение показателей топливной экономичности и токсичности ОГ ГД может

быть достигнуто отключением части цилиндров и работой остальных цилиндров в режимах с полной нагрузкой.

4. Метод отключения цилиндров необходимо применять одновременно с методом снижения выбросов оксидов азота.

## Литература

- [1] Александров А.А., Марков В.А., ред. *Альтернативные топлива для двигателей внутреннего сгорания*. Москва, ООО НИЦ «Инженер», ООО «Онико-М», 2012. 791 с.
- [2] Лapidус А.Л., Крылов И.Ф., Жагфаров Ф.Г., Емельянов В.Е. *Альтернативные моторные топлива*. Москва, ЦентрЛитНефтеГаз, 2008. 288 с.
- [3] Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И. *Токсичность отработавших газов дизелей*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 376 с.
- [4] Кульчицкий А.Р. *Токсичность автомобильных и тракторных двигателей*. Владимир, Изд-во Владимирского государственного университета, 2000. 256 с.
- [5] Гайворонский А.И., Марков В.А., Илатовский Ю.В. *Использование природного газа и других альтернативных топлив в дизельных двигателях*. Москва, ООО «ИРЦ Газпром», 2007. 480 с.
- [6] Мельник Г.В. Развитие газовых двигателей. *Двигателестроение*, 2010, № 2, с. 37–52.
- [7] Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А. *Топливная аппаратура и системы управления дизелей*. Москва, Легион-Автодата, 2005. 344 с.
- [8] Парсаданов И.В. *Повышение качества и конкурентоспособности дизелей на основе комплексного топливно-экологического критерия*. Харьков, Изд-во Харьковского политехнического института, 2003. 244 с.
- [9] Ерохов В.И., Николаенко А.В. Оценка экологической безопасности современных транспортных средств. *Транспорт на альтернативном топливе*, 2009, № 1, с. 67–73.
- [10] Звонов В.А., Козлов А.В., Кутенев В.Ф. Экологическая безопасность автомобиля с учетом его полного жизненного цикла. *Автомобильная промышленность*, 2000, № 11, с. 7–12.
- [11] Селиванов С.В. *Газовые двигатели с системой питания «Econtrols»*. Презентация. КАМАЗ-центр, 2015. 36 с. URL: <https://www.kolesa.ru/news/glave-kamaza-predstavili-modernizirovannyye-gazovyye-motory> (дата обращения 05 мая 2018).
- [12] Селиванов С.В. Газовые двигатели RGK.EC.820 для большегрузных автомобилей на природном газе. *Газовая промышленность*, 2017, № 9, с. 114–116.
- [13] Патрахальцев Н.Н., Виноградов Л.В., Лотфуллин Ш.Р. Возможности повышения экономичности автобусного газового двигателя КАМАЗ регулированием его рабочего объема. *Грузовик*, 2017, № 7, с. 3–8.
- [14] Александров А.А., Иващенко Н.А., ред. *Машиностроение. Энциклопедия. Том IV. Двигатели внутреннего сгорания*. Москва, Машиностроение, 2013. 784 с.
- [15] Драгунов Г.Д., Мурог И.А., Медведев А.Н. Эффективность отключения части цилиндров для повышения топливной экономичности дизеля КАМАЗ-740.10. *Двигателестроение*, 2010, № 2, с. 34–36.

## References

- [1] *Al'ternativnyye topliva dlya dvigateley vnutrennego sgoraniya* [Alternative fuels for internal combustion engines]. Ed. Aleksandrov A.A., Markov V.A. Moscow, ООО NITS "Inzhener" publ., ООО "Oniko-M" publ., 2012. 791 p.
- [2] Lapidus A.L., Krylov I.F., Zhagfarov F.G., Emel'yanov V.E. *Al'ter-nativnyye motornyye topliva* [Alternative motor fuels]. Moscow, TsentrLitNefteGaz publ., 2008. 288 p.
- [3] Markov V.A., Bashirov R.M., Gabitov I.I. *Toksichnost' otrabotavshikh gazov dizeley* [Toxicity of diesel exhaust gases]. Moscow, Bauman Press, 2002. 376 p.
- [4] Markov V.A., Bashirov R.M., Gabitov I.I. *Toksichnost' otrabotavshikh gazov dizeley* [Toxicity of automobile and tractor engines]. Vladimir, VSU publ., 2000. 256 p.

- [5] Gayvoronskiy A.I., Markov V.A., Ilatovskiy Yu.V. *Ispol'zovaniye prirodnogo gaza i drugih al'ternativnykh topliv v dizel'nykh dvigatelyakh* [The use of natural gas and other alternative fuels in diesel engines]. Moscow, ООО "IRTS Gazprom" publ., 2007. 480 p.
- [6] Mel'nik G.V. Progress of Gas Engines. *Dvigatelistroyeniye*, 2010, no. 2, pp. 37–52 (in Russ.).
- [7] Grekhov L.V., Ivashchenko N.A., Markov V.A. *Toplivnaya apparatura i si-stemy upravleniya dizeley* [Fuel injection equipment and control systems of diesel engines]. Moscow, Legion-Avtodata publ., 2005. 344 p.
- [8] Parsadanov I.V. *Povysheniye kachestva i konkurentosposobnosti dizeley na osnove kompleksnogo toplivno-ekologicheskogo kriteriya* [Improving the quality and competitiveness of diesel engines on the basis of integrated fuel and environmental criteria]. Khar'kov, KhPI publ., 2003. 244 p.
- [9] Erohov V.I., Nikolaenko A.V. Environmental safety assessment of modern vehicles. *Alternative Fuel Transport*, 2009, no. 1, pp. 67–73 (in Russ.).
- [10] Zvonov V.A., Kozlov A.V., Kutenev V.F. Environmental safety of the vehicle taking into account its full life cycle. *Avtomotive Industry*, 2000, no. 11, pp. 7–12 (in Russ.).
- [11] Selivanov S.V. *Gazovyye dvigateli s sistemoy pitaniya "Econtrols". Prezentatsiya*. KAMAZ-tsentr, 2015. 36 p. Available at: <https://www.kolesa.ru/news/glave-kamaza-predstavili-modernizirovannyye-gazovyye-motory> (accessed 05 May 2018).
- [12] Selivanov S.V. Gas engines RGK.EC.820 for heavy vehicles on natural gas. *Gazovaya promyshlennost'*, 2017, no. 9, pp. 114–116 (in Russ.).
- [13] Patrakhaltsev N.N., Vinogradov L.V., Lotfullin Sh.R. Some opportunities of ricing of gas-engine fuel economy of bus by active displacement regulation. *Truck: Transportation Complex and Special Technique*, 2017, no. 7, pp. 3–8 (in Russ.).
- [14] *Mashinostroyeniye. Entsiklopediya. T. 4. Dvigateli vnutrennego sgoraniya* [Engineering. Encyclopedia. Vol. 4. Internal combustion engine]. Ed. Aleksandrov A.A., Ivashchenko N.A. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 2013. 784 p.
- [15] Dragunov G.D., Murog I.A., Medvedev A.N. Disabling of a Part of Cylinders Improves Fuel Efficiency of KamAZ-740.10 Engine. *Dvigatelistroyeniye*, 2010, no. 2, pp. 34–36 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 23.10.2018

## Информация об авторах

**МАРКОВ Владимир Анатольевич** — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Поршневые двигатели». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: vladimir.markov58@yandex.ru).

**БАРЧЕНКО Филипп Борисович** — кандидат технических наук, доцент кафедры «Поршневые двигатели». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: barchenko@mail.ru).

**ЛОТФУЛЛИН Шамиль Рафилевич** — аспирант кафедры «Поршневые двигатели». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: lshr@mail.ru).

## Information about the authors

**MARKOV Vladimir Anatolievich** — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Piston Engines Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: vladimir.markov58@yandex.ru).

**BARCHENKO Filipp Borisovich** — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Piston Engines Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: barchenko@bmstu.ru).

**LOTFULLIN Shamil Rafilievich** — Postgraduate, Piston Engines Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: lshr@mail.ru).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Марков В.А., Барченко Ф.Б., Лотфуллин Ш.Р. Метод улучшения эксплуатационных показателей автомобильного газового двигателя. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 12, с. 38–44, doi: 10.18698/0536-1044-2018-12-38-44

### Please cite this article in English as:

Markov V.A., Barchenko F.B., Lotfullin Sh.R. A Technique for Improving the Performance of a Gas Engine. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2018, no. 12, pp. 38–44, doi: 10.18698/0536-1044-2018-12-38-44