

Научный обзор
УДК 621.43

Обзор современных технологий использования природного газа в качестве топлива в двигателях внутреннего сгорания

Константин Александрович Никифоров

Государственный научный центр Российской Федерации Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт „НАМИ“», Москва, Россия
nikikos@list.ru

Аннотация. В работе проведён анализ существующих стратегий организации рабочего процесса газового двигателя с точки зрения соответствия современным экологическим требованиям, энергоэффективности и мощностным характеристикам. Рассмотрены следующие стратегии: работа газового двигателя на бедных смесях, на стехиометрической смеси, в двухтопливном режиме, впрыском природного газа под большим давлением. Описаны экспериментальные данные, выявлены плюсы и минусы каждой из стратегий, сделан вывод о перспективах и необходимости дальнейших исследований. Получено, что использование различных стратегий организации рабочего процесса газового двигателя позволяет добиться снижения удельного расхода топлива на 5,6%, снижения выбросов токсичных веществ с отработавшими газами до 80%. Снижение расходов на топливо в 2,3 раза по сравнению с дизельными двигателями.

Ключевые слова: газовый двигатель, стратегия организации рабочего процесса, двухтопливный двигатель, газовый двигатель на бедной смеси, газовый двигатель на стехиометрической смеси, газовый двигатель с непосредственным впрыском природного газа под большим давлением.

Для цитирования: Никифоров К.А. Обзор современных технологий использования природного газа в качестве топлива в двигателях внутреннего сгорания // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2024. № 2 (40).

Original article

An overview of modern technologies for using natural gas as fuel in internal combustion engines

Konstantin A. Nikiforov

The Central Scientific Research Automobile and Automotive Engines Institute, Moscow, Russia
nikikos@list.ru

Abstract. The paper analyzes the existing strategies for organizing the workflow of a gas engine in terms of compliance with modern environmental requirements, energy efficiency and power characteristics. The following strategies are considered: operation of a gas engine on poor mixtures, on a stoichiometric mixture, in dual-fuel mode, by injection of natural gas under high pressure. Experimental data are described, the pros and cons of each strategy are identified, and a conclusion is made about the prospects and the need for further research. It was found that the use of various strategies for organizing the working process of a gas engine makes it possible to reduce specific fuel consumption by 5.6%, reduce emissions of toxic substances with exhaust gases by up to 80%. Reduction of fuel costs by 2.3 times compared to diesel engines.

Keywords: gas engine, workflow strategy, dual-fuel engine, gas engine with a lean-burning mixture, gas engine with a stoichiometric mixture, gas engine with direct injection of natural gas under high pressure.

For citation: Nikiforov K.A. An overview of modern technologies for using natural gas as fuel in internal combustion engines. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2024. No. 2 (40).

Введение

В настоящее время экологические проблемы касаются всех развитых стран и диктуют нормы и правила для промышленности и транспорта.

Транспортная отрасль производит почти 25% объёма всех выбросов парниковых газов. Большую часть из них составляют автомобильные перевозки (более 70% выбросов), затем морские суда (15%) и авиация (10%). Основную долю выбросов производят легковые и грузовые автомобили.

Важным направлением обеспечения экологической безопасности является перевод части автотранспортных средств на использование альтернативных видов топлива, прежде всего природного газа (ПГ).

Россия находится на первом месте по величине доказанных запасов природного газа. Это может являться преимуществом при планировании экономических затрат, при условии того, что запасов нефти в России хватит на более короткий срок [1].

Совершенствование экологических и экономических характеристик двигателей внутреннего сгорания (ДВС), работающих на различных видах топлива, является актуальным направлением в современном мире, где вопросы экологии и устойчивого развития играют ключевую роль. В

качестве основных видов топлива рассматриваются нефтяные топлива, такие как бензин и дизельное топливо, а также природный газ.

Использование природного газа в качестве моторного топлива позволяет значительно сократить выбросы углеводородов (за исключением метана) и взвешенных частиц в окружающую среду, благодаря меньшему соотношению углерода к водороду по сравнению с нефтяными топливами. Основными токсичными веществами, которые выбрасываются двигателями, работающими на природном газе, становятся оксиды азота и метан [2].

На конференции ООН по изменению климата в 2021 году было дополнено «Глобальное обязательство по метану», в котором страны обязуются сократить выбросы метана на 30% к 2030 году [3]. Это является одним из обстоятельств, требующих поиска новых решений и оптимизации существующих технологий рабочего процесса газовых двигателей. Однако никаких штрафных санкций для государств за нарушение этих обязательств не предусмотрено.

В данной статье проводится анализ существующих способов организации рабочего процесса газового двигателя, таких как работа на стехиометрической смеси, работа на обеднённой смеси, работа в двухтопливном режиме и работа с непосредственным впрыском газа в камеру сгорания.

Обзор технологий применения природного газа в качестве моторного топлива

Каждый из способов организации рабочего процесса газового двигателя обладает своими особенностями и подходит для достижения конкретных целей.

Использование способа организации рабочего процесса с работой газового ДВС на бедных смесях с искровым зажиганием является экономически эффективным при необходимости соответствия выбросам оксидов азота меньше двух граммов на киловатт в час. Требуются

окислительный нейтрализатор и система селективного каталитического восстановления оксидов азота для соответствия требованиям стандарта EURO 6. Предъявляются высокие требования к системе зажигания.

В работе [4] исследовалось влияние эксплуатационных и конструктивных параметров на межцикловую нестабильность рабочего процесса с принудительным воспламенением, работающего на природном газе. Коэффициент избытка воздуха во время испытаний был равен 1,3. В результате проведённых экспериментов было выяснено, что межцикловая нестабильность снижается благодаря повышению частоты вращения коленчатого вала двигателя, увеличению нагрузки на двигатель, увеличению степени сжатия.

Организация рабочего процесса с работой газового ДВС на **стехиометрической смеси** является наиболее перспективной для соответствия стандарту EURO 6. Для выполнения требований по выбросам вредных веществ с отработавшими газами при использовании такого способа организации необходимо использование окислительно-восстановительного нейтрализатора. Использование стехиометрической смеси в двигателях позволяет получить больший крутящий момент, по сравнению с двигателями, работающими на обеднённой смеси. При использовании такой стратегии возникают высокие тепловые нагрузки, для снижения которых может быть использована система рециркуляции отработавших газов.

В работе [5] проводилось сравнение двух описанных выше стратегий. Объектом исследования был двигатель TG103/G10A со степенью сжатия 11,8 в двух модификациях: исходная, работающая на обеднённых смесях (коэффициент избытка воздуха от 1 до 1,6) и изменённая компанией Volvo, для работы на стехиометрической смеси. Дополнительно на двигатель были установлены каталитический нейтрализатор и система рециркуляции отработавших газов (EGR). Комплексные изменения позволили добиться

снижения выбросов оксидов азота и углеводородов с отработавшими газами на ~90% по сравнению со стратегией работы на обеднённой смеси.

Организация рабочего процесса газового двигателя в двухтопливном режиме

При использовании такого способа организации в газодизельных двигателях применяется комбинация систем топливоподачи дизельного топлива непосредственно в цилиндр и природного газа во впускной коллектор. При этом возможна работа с малой долей замещения дизельного топлива природным газом (примерно до 30%) при больших нагрузках на двигатель и большой долей замещения (примерно до 85%) при работе двигателя на экономичных режимах. Тепловые нагрузки такие же, как при работе на дизельном топливе. Есть сложности с соответствием требованиям по выбросам углеводородов. Необходима сложная система управления процессом сгорания и многоступенчатая система нейтрализации вредных выбросов.

В работе [6] авторы проводили исследование рабочего процесса одноцилиндрового безнаддувного газодизельного двигателя со степенью сжатия 17 при различных степенях замещения дизельного топлива природным газом (от 30 до 85%). В результате проведённых работ было выяснено, что при повышении доли замещения дизельного топлива природным газом температура сгорания и выбросы взвешенных частиц с отработавшими газами снижались.

Способ организации рабочего процесса газового двигателя с **непосредственным впрыском природного газа под большим давлением** является технологией с высоким потенциалом эффективности достижения современных экологических норм. Также возможна работа на дизельном топливе в аварийном режиме. Применяется диффузионное сгорание с использованием пилотной запальной дозы дизельного топлива (примерно 5% от номинальной массовой подачи природного газа) для инициации сгорания

природного газа. Эффективность и удельная мощность, тепловые нагрузки такой системы аналогичны дизельному топливу, позволяя при этом снизить выбросы CO_2 на величину до 25%.

При такой стратегии работы выбросы оксидов азота примерно равны выбросам при работе на дизельном топливе, выбросы твёрдых частиц значительно ниже, чем у дизеля. Необходимо использование сжиженного природного газа.

В работе [7] проводилось сравнение судовых двигателей различного типа: исходный дизельный двигатель EY26LW (двигатель типа ЧН 28/38,5) с цилиндровой мощностью 307 кВт при частоте вращения коленчатого вала 720 об/мин и среднем эффективном давлении 2,51 МПа и два созданных на его базе двигателя, работающих на обеднённой смеси – газовый и двухтопливный - EYG26L и EY26DF [8]. В результате исследований удалось достичь снижения выбросов вредных веществ с отработавшими газами до 80%, снижения удельного эффективного расхода на 3,9% для газового двигателя и на 1,6% для двухтопливного двигателя.

Основные проблемы газовых двигателей: необходимость улучшения мощностных и экологических характеристик. Вне зависимости от того, каким образом сконструирован газовый двигатель (конвертация из бензинового или газового двигателя, либо изначальный расчёт двигателя для работы на природном газе), возникают особенности с организацией работы таких двигателей:

- для использования газа необходимо оборудовать автомобили специальными баллонами для компримированного или сжиженного природного газа, либо компоновать место для хранения двух видов топлива, необходимого для работы газодизеля;
- выбор стратегии рабочего процесса (работа на стехиометрической смеси, работа на обеднённой смеси) [5];

- решение проблем с оптимизацией работы систем двигателя (тип впрыска, исключение детонационного сгорания, достижение требуемых показателей выбросов) [9].

На рисунках 1 и 2 показаны характеристики двигателей, достигаемые при использовании различных стратегий работы и технологий [10].

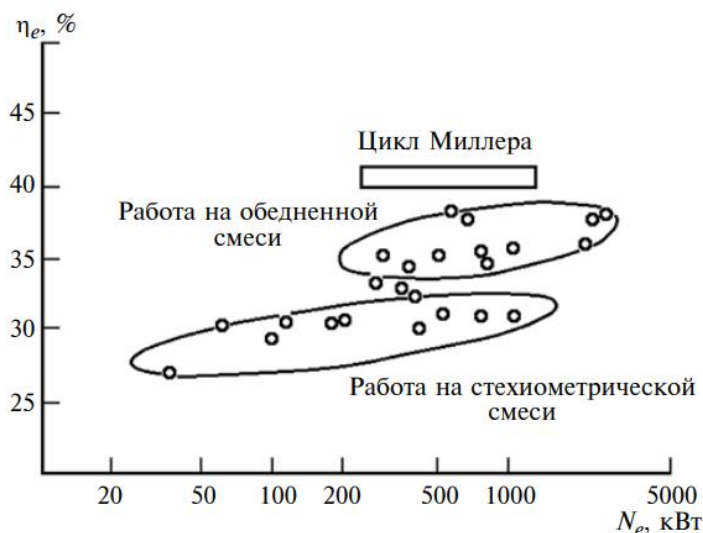


Рис. 1. Области изменения эффективных КПД для различных способов организации рабочего процесса газовых двигателей [10]

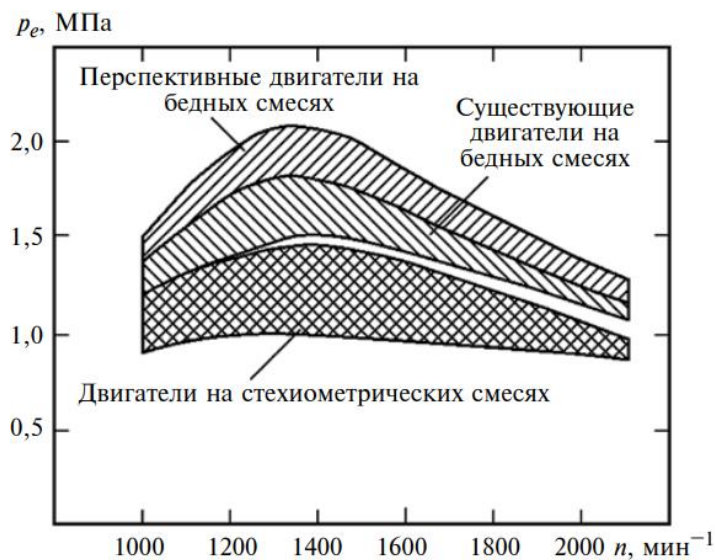


Рис. 2. Внешние скоростные характеристики газовых двигателей при организации рабочего процесса с разной степенью обеднения свежего заряда [10]

В работе [11] проводился анализ математической модели дизельного двигателя и его аналогов, конвертированных на природный газ, работающих

на обеднённой и стехиометрической смеси, а также газодизельный вариант исходного двигателя. В результате моделирования были сделаны выводы о снижении удельного эффективного расхода газодизеля на 13%, газового двигателя на бедной смеси на 5,6%, на стехиометрической смеси – на 1,5%. Расходы на топливо снизились в 2,36, 2,33 и 2,21 раза для газодизеля, газовых двигателей на бедной и стехиометрической смеси соответственно по сравнению с базовым дизелем.

Выводы

1. Использование природного газа в качестве альтернативного топлива для газовых двигателей с различными способами организации рабочего процесса позволяет снизить удельный расход топлива до ~15%, сохранив при этом эффективную мощность, или незначительное снижение до ~15% для различных стратегий, соблюдение требований современных экологических норм со значительным снижением выбросов токсичных веществ до 80%. При этом расходы на топливо снижаются до 2, 3 раз.

2. Сравнение способов организации рабочего процесса можно провести только косвенно, так как оптимальные конструктивные параметры двигателя (степень сжатия, турбокомпрессор, топливная система) не могут быть универсальными.

3. Исходя из полученной информации, можно сделать вывод о том, что наибольшей эффективности рабочего процесса можно добиться, используя комбинацию непосредственного впрыска природного газа под высоким давлением, системы EGR и систем нейтрализации отработавших газов.

Для создания газового двигателя, соответствующего вышеописанным требованиям необходимо создание, или оптимизация топливной аппаратуры, а также системы управления, которые позволят регулировать рабочие процессы, протекающие в двигателе, с необходимой скоростью и точностью. При таком подходе возможно создание газового двигателя, почти не уступающего дизельному аналогу, позволяя при этом получить экономию на расходах на топливо.

Список источников

1. BP, Statistical Review of World Energy, 2022, 71st edition, June.
2. Lidong Liu. A Review of Development of Natural Gas Engines / Lidong Liu, Mengli Zhang, Zhengbai Liu // International Journal of Automotive Manufacturing and Materials. – 2023. Vol. 2, Issue 1. – DOI 10.53941/ijamm0201004.
3. COP26: Key Outcomes From the UN Climate Talks in Glasgow / H. Mountford >et al. // World Resources Institute. – 2021. – Электронный ресурс. – URL: <https://www.wri.org/insights/cop26-key-outcomes-un-climate-talks-glasgow> (Дата обращения: 16.02.2024).
4. Xiongbo Duan. Experimental study the impacts of the key operating and design parameters on the cycle-to-cycle variations of the natural gas SI engine / Xiongbo Duan, Deng Banglin, Liu Yiqun, Li Yangyang, Liu Jingping // Fuel. – 2021. – Vol. 290. – DOI 10.1016/j.fuel.2020.119976.
5. Einewall, P. Lean Burn Natural Gas Operation vs. Stoichiometric Operation with EGR and a Three Way Catalyst / P. Einewall, P. Tunestål, B. Johansson // In SAE Special Publications. – 2005. – P. 343-362. – doi.org/10.4271/2005-01-0250.
6. An optical investigation of substitution rates on natural gas/diesel dual-fuel combustion in a diesel engine / Lee Chia-Fone, Pang Yuxin, Wu Han, Nithyanandan Karthik, Liu Fushui // Applied Energy. – 2020. – Vol. 261 (3). – DOI10.1016/j.apenergy.2019.114455.
7. Живлюк, Г. Е. Экологическая безопасность энергетических установок: двухтопливные и газовые двигатели / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2022. – Т. 14, № 3. – С. 449-462. – DOI 10.21821/2309-5180-2022-14-3-449-462. – EDN IWDJGT.
8. Hagiwara R. Development of pure marine gas engine (EYG26L) / R. Hagiwara, I. Ohashi // Marine Engineering. – 2015. – Vol. 50. – Is. 6. – P. 719–725. DOI 10.5988/jime.50.719.
9. Experimental research and computer simulation of knock onset in a heavy-duty SI gas engine / A. Kozlov, A. Terenchenko, N. Zuev, I. Gattarov // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE). – 2019. – Vol. 8 (12). – P. 730-736. – DOI 10.35940/ijitee.L3072.1081219
10. Марков, В. А. Проблемы использования природного газа в качестве моторного топлива для городского автотранспорта / В. А. Марков // Грузовик. – 2015. – № 4. – С. 6-12. – EDN TSZVAL.
11. Прогнозирование изменения показателей дизеля при его конвертации для работы по газовому и газодизельному циклу / В. В. Синявский, И. А. Широков, Г. В. Пронченко, Е. А. Голдин // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2023. – № 2(36). – EDN OGEГXX.

References

1. BP, Statistical Review of World Energy, 2022, 71st edition, June.
2. Lidong Liu, Mengli Zhang, Zhengbai Liu. *International Journal of Automotive Manufacturing and Materials*, 2023, vol. 2 (1), DOI 10.53941/ijamm0201004.
3. URL: <https://www.wri.org/insights/cop26-key-outcomes-un-climate-talks-glasgow> (16.02.2024).
4. Xiongbo Duan, Deng Banglin, Liu Yiqun, Li Yangyang, Liu, Jingping. *Fuel*, 2021, vol. 290, DOI 10.1016/j.fuel.2020.119976.
5. Einewall P., Tunestål P., Johansson B. In *SAE Special Publications*, 2005, pp. 343-362, doi.org/10.4271/2005-01-0250.
6. Lee Chia-Fone, Pang Yuxin, Wu Han, Nithyanandan Karthik, Liu Fushui. *Applied Energy*, 2020, vol. 261 (3), DOI 10.1016/j.apenergy.2019.114455.
7. Zhivlyuk G.Ye., Petrov A.P. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova*, 2022, vol. 14, no. 3, pp. 449-462, DOI 10.21821/2309-5180-2022-14-3-449-462.
8. Hagiwara R., Ohashi I. *Marine Engineering*, 2015, vol. 50 (6), pp. 719–725, DOI 10.5988/jime.50.719.
9. Kozlov A., Terenchenko A., Zuev N., Gattarov I. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 2019, Vol. 8 (12), pp. 730-736, DOI 10.35940/ijitee.L3072.1081219.
10. Markov V.A. *Gruzovik*, 2015, no. 4, pp. 6-12.
11. Sinyavskiy V.V., Shirokov I.A., Pronchenko G.V., Goldin Ye.A. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*, 2023, no. 2(36).

Рецензент: Корнилов Г.С., д-р техн. наук, главный специалист, ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»

Информация об авторе

Никифоров Константин Александрович, аспирант, ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ».

Information about the author

Nikiforov Konstantin A., postgraduate, FSUE «NAMI».

Статья поступила в редакцию 19.04.2024; одобрена после рецензирования 06.05.2024; принята к публикации 05.06.2024.

The article was submitted 19.04.2024; approved after reviewing 06.05.2024; accepted for publication 05.06.2024.