

Научная статья
УДК 621.432

Прогнозирование изменения показателей дизеля при его конвертации для работы по газовому и газодизельному циклу

Владимир Викторович Синявский¹, Игорь Алексеевич Широков²

Григорий Всеволодович Пронченко³, Евгений Алексеевич Голдин⁴

^{1,2,3,4}Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
Москва, Россия

¹sinvlad@mail.ru

²shirokova1@mail.ru

³mcpersonwinston00@gmail.com

⁴goldin.zheka@mail.ru

Аннотация. По модели расчета 4-тактного цикла двигателя МАДИ проанализировано изменение эффективных показателей дизеля при его конвертации в газодизель и газовые двигатели, работающие на бедной и стехиометрической смесях. Показано, что при конвертации дизеля в газовый двигатель из-за снижения степени сжатия увеличиваются параметры системы наддува. Для каждого двигателя подобран оптимальный турбокомпрессор. Получено, что на номинальном режиме дизель и газодизель имеют близкий эффективный КПД, у газового двигателя на бедной смеси он снижается на 9,3%, а на стехиометрической – на 13,9%. Рассчитана стоимость дизельного топлива и природного газа за единицу выделяемой теплоты и показано, что с учетом изменения эффективного КПД на номинальном режиме по сравнению с дизелем расходы на топливо газодизеля снижаются в 2,36 раза, газового двигателя на бедной смеси – в 2,33 раза, а газового двигателя на стехиометрической смеси – в 2,21 раза.

Ключевые слова: газодизель, газовый двигатель на бедной смеси, газовый двигатель на стехиометрической смеси, наддув газового двигателя, снижение затрат на топливо газового двигателя.

Для цитирования: Синявский В.В., Широков И.А., Пронченко Г.В., Голдин Е.А.

Прогнозирование изменения показателей дизеля при его конвертации для работы по газовому и газодизельному циклу // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2023. №2 (36).

Original article

Forecasting changes in diesel performance during its conversion to work on the gas and gas-diesel cycle

Vladimir V. Sinyavsky¹, Igor A. Shirokov², Grigory V. Pronchenko³, Evgeny A. Goldin⁴

^{1,2,3,4}Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI),
Moscow, Russia

¹sinvlad@mail.ru

²shirokova1@mail.ru

³mcpersonwinston00@gmail.com

⁴goldin.zheka@mail.ru

Abstract. Using the MADI model for calculating the 4-stroke cycle of IC engine, the change in the effective performance of a diesel engine when it is converted into gas diesel engine and gas engines operating on lean and stoichiometric mixtures is analyzed. It is shown that when converting a diesel engine to a gas engine, the parameters of its boost system increase due to a decrease in the compression ratio. The optimal turbocharger was selected for each engine. It was found that in a rated mode, diesel and gas-diesel engines have a close effective efficiency, in a gas engine on a lean mixture it decreases by 9.3%, and in a stoichiometric one - by 13.9%. The cost of diesel fuel and natural gas per unit of heat released was calculated and it was shown that, taking into account the change in effective efficiency in a rated mode, compared to diesel engine, the fuel costs of gas diesel engine are reduced by 2.36 times, of a lean gas engine by 2.33 times, and a gas engine on a stoichiometric mixture - 2.21 times.

Keywords: gas-diesel engine, lean-burn gas engine, stoichiometric gas engine, gas engine turbocharging, reduction of gas engine fuel costs.

For citation: Sinyavsky V.V., Shirokov I.A., Pronchenko G.V., Goldin E.A. Forecasting changes in diesel performance during its conversion to work on the gas and gas-diesel cycle. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2023. №2 (36).

Актуальность темы

Применение природного газа в ДВС актуально, поскольку его стоимость значительно меньше, чем дизельного топлива. При переходе на питание дизелей природным газом снижаются выбросы оксидов азота (NO_x), оксида углерода (CO), углекислого газа (CO_2), а в зависимости от способа конвертации снижаются или полностью отсутствуют выбросы сажи [1]. Но увеличиваются выбросы несгоревших углеводородов (CH), поскольку в

отличие от дизельного топлива газ заполняет зазоры между поршнем и головкой блока цилиндров, поршнем и гильзой, а также образуются несгоревшие углеводороды в результате гашения пламени на стенках камеры сгорания и внутри объема цилиндра [2]. При подаче газового топлива во впускную систему двигателя происходит замещение им части впускного воздуха, которое для коэффициента избытка воздуха $\alpha = 1,5$ составляет 6...10%, а для $\alpha = 1,0$ – 10%. Это приводит к уменьшению мощности двигателя [3].

Дизели могут конвертироваться для работы на природном газе по газодизельному либо газовому циклу для работы на бедной или стехиометрической смеси. Конвертация дизеля в газодизель выполняется проще, поскольку не требует изменения конструкции двигателя, а обеспечивается установкой дополнительных систем. Автомобиль с газодизелем может продолжать движение в дизельном режиме, если закончится газовое топливо. В газодизеле детонация проявляется значительно слабее, чем в газовом двигателе, что позволяет применять газодизельный цикл для двигателей больших размеров и с высокой степенью форсирования наддувом [4, 5].

Показатели газодизеля сильно зависят от параметров впрыскивания дизельного топлива: доли его запальной порции, давления впрыскивания, формы переднего фронта характеристики впрыскивания. Эти параметры можно подобрать с использованием экспериментальных и расчетных методов [6].

Газовый двигатель обеспечивает полное замещение дизельного топлива газом, дешевле, поскольку не требует установки дизельной топливоподающей аппаратуры. В стехиометрическом газовом двигателе улучшаются процессы воспламенения и сгорания газозоудшной смеси, уменьшается вероятность возникновения детонации, возможно применение трёхкомпонентного каталитического нейтрализатора, позволяющего одновременно снижать выбросы CO, CH и NO_x. В газовом двигателе на

бедной смеси лучше топливная экономичность, меньше выбросы NO_x без нейтрализатора, возможно большее форсирование наддувом, так как температура отработавших газов ниже [7].

Конвертация по газовому циклу широко применяется для бензиновых двигателей легковых автомобилей, а по газодизельному циклу – для больших тепловозных и судовых дизелей, поскольку использованию в них газового цикла препятствует детонация.

Для конвертации на питания газом дизелей грузовых автомобилей одинаково хорошо подходят газовый и газодизельный циклы. В регионах с густой сетью газозаправочных станций чаще используются газовые двигатели, а там, где таких станций недостаточно – газодизели.

При конвертации дизеля в газодизель турбокомпрессор не меняется, чтобы обеспечить полноценную работу в дизельном режиме. При конвертации в газовый двигатель необходимо изменять турбокомпрессор, чтобы он обеспечивал снижение давления наддува. Для этого можно использовать теорию подобия и размерностей [8].

Для принятия решения о целесообразности конвертации дизеля для работы на газовом топливе необходимо оценить снижение расходов на топливо. Стоимость жидкого и газового топлива на заправочных станциях позволяет лишь ориентировочно оценить снижение затрат, так как переход на газовое топливо может привести к изменению его расхода по сравнению с дизельным. Это связано с тем, что плотность и низшая теплота сгорания дизельного и газового топлив отличаются, а также изменяется эффективный КПД дизеля при его конвертации для работы на газе. Поэтому для корректного определения изменения расходов на топливо следует определить стоимость единичного количества теплоты, получаемого при сжигании разных топлив, а также учитывать изменение эффективного КПД при конвертации дизеля для работы на газе.

Поскольку в Московской области метан составляет порядка 98 процентов природного газа, в расчётах принималось, что природный газ полностью состоит из метана.

Цель данной работы заключается в проведении расчетного сравнительного анализа показателей двигателя, работающего по дизельному, газодизельному циклу, а также по газовому циклу на бедной и стехиометрической смеси. Также требуется оценить снижение расходов на топливо газодизеля, газовых двигателей на бедной и стехиометрической смеси по сравнению с дизелем.

Методика проведения исследований

Использовался программный комплекс расчеты дизеля, газодизеля, газового двигателя МАДИ [9]. Объектом исследования служил двигатель 6ЧН10,7/12,4, Cummins 6.7 esbe имеющий на номинальном режиме при частоте вращения 2300 мин^{-1} среднее эффективное давление 1,73 МПа и мощность 220 кВт. Расчеты проводились для номинального режима работы. Использовалась степень сжатия 17,0 для дизеля и газодизеля, а также 10,0 для обоих газовых двигателей. Для каждого двигателя, работающего на природном газе, подбиралась цикловая подача топлива, обеспечивающая такую же величину среднего эффективного давления, что у базового дизеля. Для каждого двигателя подбирался оптимальный по топливной экономичности угол опережения воспламенения топлива. Снижение давления наддува газовых двигателей обеспечивалось увеличением площади минимального проходного сечения турбины $F_{т0}$.

Параметры процесса сгорания задавались по формуле И. Вибе. Для дизеля, газодизеля и обоих газовых двигателей использовались значения длительности тепловыделения $\varphi_z = 70, 36$ и 40 градусов поворота коленчатого вала, а также показателя характера тепловыделения $m, = 0,5, 1,0$ и $1,5$, полученные расчетами по модели AVL FIRE.

Результаты исследования

При неизменном турбокомпрессоре в случае уменьшения степени сжатия газового двигателя получено увеличение параметров системы наддува газового двигателя на бедной смеси по сравнению с дизелем, как показано в таблице 1.

Таблица 1

Изменение параметров системы наддува дизеля
после его конвертации в газовый двигатель

	Давление наддува МПа	Противодавление перед турбиной, МПа	Частота вращения ротора, мин ⁻¹	Температура отработавших газов, К
Дизель	0,215	0,205	89500	800
Газовый двигатель	0,252	0,234	101100	809

Как видно из таблицы 1, повышение параметров системы наддува при уменьшении степени сжатия и, соответственно, степени расширения, вызвано повышением температуры и давления газов, выходящих из цилиндра. В итоге увеличиваются располагаемая работа газа и мощность турбины, что приводит к увеличению частоты вращения ротора турбокомпрессора, расхода воздуха, давления и температуры наддувочного воздуха. Поэтому для газовых двигателей подбирались турбины с увеличенной площадью проходного сечения для снижения давления наддува, чтобы получить коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,46$ для бедной смеси и $\alpha = 1,0$ для стехиометрической смеси. Использовались обобщенные характеристики компрессоров и турбин, разработанные в МАДИ.

Расположение точек совместной работы дизеля и двух газовых двигателей на характеристике компрессора, представлено на рис. 1.

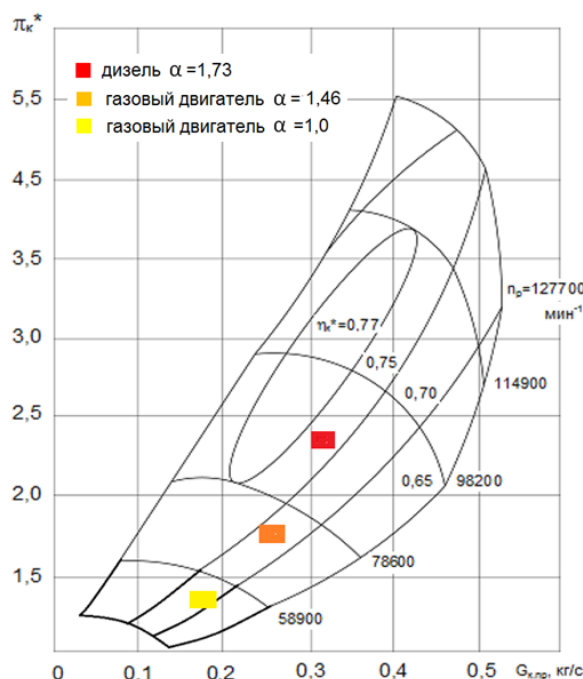


Рис. 1. Расположение точек совместной работы дизеля и газовых двигателей на бедной и стехиометрической смеси на характеристике компрессора Holset HE351W

В таблице 2 приводятся результаты расчета основных параметров четырех двигателей: удельного эффективного расхода топлива g_e , коэффициента избытка воздуха α , индикаторного КПД η_i , эффективного КПД η_e , средней температуры газа перед турбиной T_t , частоты вращения ротора турбокомпрессора n_p , давления наддува p_k .

Таблица 2

Сравнение показателей работы дизеля, газодизеля и двух газовых двигателей

	g_e , г/кВт.ч	α	η_i	η_e	T_t , К	n_p , мин ⁻¹	p_k , МПа
Дизель	196	1,71	0,494	0,432	800	89510	0,215
Газодизель	170	1,68	0,491	0,430	803	89000	0,212
Газовый двигатель на бедной смеси	185	1,50	0,446	0,392	1002	72200	0,163
Газовый двигатель стехиометрический	193	1,0	0,422	0,372	1205	54642	0,135

Как видно из таблицы 2, снижение индикаторного и эффективного КПД газовых двигателей по сравнению с дизелем вызвано, прежде всего, снижением степени сжатия, а у газового двигателя на стехиометрической смеси – дополнительно уменьшением коэффициента избытка воздуха. Несмотря на снижение эффективного КПД удельный эффективный расход топлива у газовых двигателей получился выше, чем у дизеля, поскольку низшая теплота сгорания метана на 18% больше, чем у дизельного топлива.

В таблице 3 приводится сравнение стоимости дизельного топлива и метана, приведенное к единице измерения теплоты, с учетом различий плотности и низшей теплоты сгорания по данным на начало 2022 г.

Таблица 3

Сравнение стоимости дизельного топлива и природного газа

	Средняя цена на заправке	Плотность, кг/м ³	Средняя цена, руб/кг	Низшая теплота сгорания, МДж/кг	Средняя цена, руб/МДж	Выигрыш в цене по сравнению с ДТ в руб/МДж
ДТ	49,45 руб/л	860	57,5	42,62	1,35	-
Метан	19,2 руб/м ³	0,73	26,3	50,0	0,53	2,57

Как видно из таблицы 3, применительно к 1 МДж теплоты, стоимость метана в 2,57 раза меньше, чем дизельного топлива. Соотношение стоимости разных видов топлива меняется год от года.

В таблице 4 приведено снижение расходов на топливо газодизеля и газовых двигателей на бедной и стехиометрической смеси с учетом изменения эффективного КПД по сравнению с дизелем на номинальном режиме. Принято, что в газодизеле на номинальном режиме доля запальной порции дизельного топлива равна 5%.

Таблица 4

Снижение расходов на топливо газодизеля и газовых двигателей с учетом изменения эффективного КПД по сравнению с дизелем

	Газодизель, 5% ДТ	Газовый двигатель на бедной смеси	Газовый двигатель на стехиометрической смеси
Снижение КПД, %	0,5	9,3	13,9
Снижение расходов на топливо, %	236	233	221

С учетом того, что эффективный КПД дизеля при конвертации в газодизель уменьшается на 0,5%, в газовый двигатель на бедной смеси – на 9,3%, а в газовый двигатель на стехиометрической смеси – на 13,9% (см. таблицу 2), выигрыш в эксплуатационных расходах на топливо для газодизеля, газового двигателя на бедной и стехиометрической смеси составит, соответственно, 2,36, 2,33 и 2,21 раза. Как показано в [10], в современном газодизеле с уменьшением нагрузки доля запальной порции дизельного топлива увеличивается и на холостом ходу достигает 33%. Поэтому с уменьшением нагрузки выигрыш в расходах на топливо газодизеля будет заметно уменьшаться.

Выводы

1. По сравнению с базовым дизелем, эффективный КПД газодизеля практически не меняется, у газового двигателя на бедной смеси уменьшился на 9,3%, у стехиометрического – на 13,9%
2. По сравнению с базовым дизелем, удельный эффективный расход топлива газодизеля уменьшается на 13%, у газового двигателя на бедной смеси – на 5,6%, у стехиометрического – на 1,5%
3. При конвертации дизеля в газовый двигатель, поскольку снижается степень сжатия, показатели системы наддува увеличиваются из-за повышения температуры и давления отработавших газов. Для получения коэффициента избытка воздуха 1,5 и 1,0 для газовых двигателей на бедной и

стехиометрической смеси увеличивалось минимальное проходное сечение турбины.

4. Стоимость метана по сравнению с дизельным топливом на единицу теплоты меньше в 2,57 раза. С учетом изменения эффективного КПД, расходы на топливо газодизеля, газовых двигателей на бедной и стехиометрической смеси уменьшились, соответственно, в 2,36, 2,33 и 2,21 раза по сравнению с базовым дизелем.

Список источников

1. Хачиян, А.С. Результаты разработки газовых двигателей в МАДИ (ГТУ) / А.С. Хачиян, В.Е. Кузнецов, В.Ф. Воддейко, И.Г. Шишлов // Автозаправочный комплекс + альтернативное топливо. – 2005. – № 3. – С. 37-41.
2. Königsson, F., Kuiper, J., Stalhammar, P., and Angstrom, H. E. The influence of crevices on hydrocarbon emissions from a diesel-methane dual fuel engine, SAE International Journal of Engines, 2013, 6(2), pp. 751-765, doi: <https://doi.org/10.4271/2013-01-0848>.
3. Матюхин, Л.М. Анализ процессов газообмена и состава рабочей смеси газового двигателя с внешним смесеобразованием / Л.М. Матюхин // Вестник Московского автомобильно-дорожного института (государственного технического университета). – 2007. – № 4(11). – С. 5-7.
4. Ghazi Karim. Dual-Fuel Diesel engines, CRC Press, 2015, 287 p.
5. Мельник, Г.В. Развитие двигателестроения за рубежом по материалам конгресса CIMAC 2013 / Г.В. Мельник // Двигателестроение. – 2013. – № 3(253). – С. 39-53.
6. Курманов, В.В. Математическое моделирование работы электрогидравлической форсунки с разгруженным от давления топлива управляющим клапаном / В.В. Курманов, О.В. Олисевиц, С.Д. Скороделов // Автомобильная промышленность. – 2007. – № 10. – С. 36-40.
7. Лукшо, В. А. Комплексный метод повышения энергоэффективности газовых двигателей с высокой степенью сжатия и укороченными тактами впуска и выпуска: специальность 05.04.02: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук/ Лукшо В. А.; Центр. науч.-исслед. автомобил. и автотопот. ин-т "НАМИ". – Москва, 2015. – 369 с.
8. Подобие процессов и подобное перестроение характеристик компрессоров / И.Е. Иванов, В.Е. Ерещенко, С.Н. Богданов, М.В. Чернуха // Вестник Московского

автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2015. – № 2(41). – С. 44-54.

9. A Zero-Dimensional Model for Internal Combustion Engine Simulation and Some Modeling Results / V.V. Sinyavski, M.G. Shatrov, A.Y. Dunin [et al.] // 2020 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology, EMCTECH 2020 - Proceedings, Vienna, 20–22 октября 2020 года. Vol. 2020-January. – Vienna, 2020. – P. 9311546. – DOI 10.1109/EMCTECH49634.2020.9311546.

10. Method of conversion of high- and middle-speed diesel engines into gas diesel engines / M.G. Shatrov, V.V. Sinyavski, A.Yu. Dunin [et al.] // Facta Universitatis. Series: Mechanical Engineering. – 2017. – Vol. 15, No. 3. – P. 383-395. – DOI 10.22190/FUME171004023S.

References

1. Khachiyan A.S., Kuznetsov V.E., Vodeiko V.F., Shishlov I.G. *Avtozapravochnyy kompleks + al'ternativnoye toplivo*, 2005, – no. 3, pp. 37-41.

2. Königsson, F., Kuiper, J., Stalhammar, P., and Angstrom, H. E., The influence of crevices on hydrocarbon emissions from a diesel-methane dual fuel engine, SAE International Journal of Engines, 2013, 6(2), pp. 751-765, doi: <https://doi.org/10.4271/2013-01-0848>.

3. Matyukhin L.M. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo instituta (gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2007, no. 4(11), pp.5-7.

4. Ghazi Karim. *Dual-Fuel Diesel engines*, CRC Press, 2015, 287 p.

5. Melnik G.V. *Dvigatestroyeniye*, 2013, no. 3(253), pp.39-53..

6. Kurmanov V.V., Olisevich O.V., Skorodelov S.D. *Avtomobil'naya promyshlennost'*, 2007, no. 10, pp. 36-40.

7. Luksho V.A. *Kompleksnyy metod povysheniya energoeffektivnosti gazovykh dvigateley s vysokoy stepen'yu szhatiya i ukorochennymi taktami vpuska i vypuska (A complex method of increasing energy efficiency of gas engines with high compression ratio and shortened intake and exhaust strokes)*, doctoral thesis, Moscow, NAMI, 2015, 365 p.

8. Ivanov I.Ye., Yereshchenko V.Ye., Bogdanov S.N., Chernukha M.V. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)*, 2015, no. 2(41), pp. 44-54.

9. A Zero-Dimensional Model for Internal Combustion Engine Simulation and Some Modeling Results / V.V. Sinyavski, M.G. Shatrov, A.Y. Dunin [et al.] // 2020 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology, EMCTECH 2020 - Proceedings, Vienna, 20–22 октября 2020 года. Vol. 2020-January. – Vienna, 2020. – P. 9311546.

10. Method of conversion of high- and middle-speed diesel engines into gas diesel engines / M.G. Shatrov, V.V. Sinyavski, A.Yu. Dunin [et al.] // Facta Universitatis. Series: Mechanical Engineering. – 2017. – Vol. 15, No. 3. – P. 383-395.

Рецензент: А.Л. Яковенко, канд. техн. наук, доц., МАДИ

Информация об авторах

Синявский Владимир Викторович, канд. техн. наук, доц., МАДИ.

Широков Игорь Алексеевич, студент, МАДИ.

Пронченко Григорий Всеволодович, студент, МАДИ.

Голдин Евгений Алексеевич, студент, МАДИ.

Information about the authors

Sinyavsky Vladimir V., Ph.D., associate professor, MADI.

Shirokov Igor A., student, MADI.

Pronchenko Grigory V., student, MADI.

Goldin Evgeny A., student, MADI.

Статья опубликована по итогам международной научно-технической конференции «10-е Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса».

Статья поступила в редакцию 18.04.2023; одобрена после рецензирования 25.04.2023; принята к публикации 17.05.2023.

The article was submitted 18.04.2023; approved after reviewing 25.04.2023; accepted for publication 17.05.2023.