

Научная статья
УДК 621.431.7, 621.431

Регулирование объемной концентрации газа отключением части цилиндров двигателя тепловоза, конвертируемого для работы по газодизельному циклу

Анатолий Геннадьевич Силюта¹, Андрей Александрович Савастенко²,
Эдуард Андреевич Савастенко³

¹АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»),
Москва, Россия

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

¹ma.leroy@yandex.ru

²dozentrudn@mail.ru

³e.d.u.a.r.d@inbox.ru

Аннотация. В соответствии с ключевыми направлениями развития, в том числе Концепцией развития рынка газомоторного топлива в Российской Федерации, Энергетической и Экологической стратегиями ОАО «РЖД» совместно с машиностроительными холдингами активно участвует в создании транспортной техники, использующей в качестве моторного топлива природный газ. Ключевой особенностью энергетических установок газотепловозов является их создание на базе дизельных аналогов, как это было сделано 30 лет назад на первых опытных образцах. Анализ конструктивных особенностей и основных технических характеристик таких двигателей позволяет сделать вывод о недостаточной проработке узких проблемных мест, имеющих место при переводе транспортных дизельных двигателей на работу по газодизельному циклу. В настоящей статье рассматриваются причины неустойчивой работы газодизельных энергетических установок тепловозов на режимах малых нагрузок и холостом ходу, а также теоретически обосновывается возможность количественного регулирования объемной концентрации газа в цилиндрах двигателя путем отключения части цилиндров для обеспечения гарантированного воспламенения смесового топлива с учетом ограничений по крутящему моменту, максимальной температуре выхлопных газов и максимальному давлению сгорания цикла.

Ключевые слова: объемная концентрация газа, отключение цилиндров, газодизельный цикл, тепловоз, двигатель внутреннего сгорания.

Для цитирования: Силюта А.Г., Савастенко А.А., Савастенко Э.А., Регулирование объемной концентрации газа отключением части цилиндров двигателя тепловоза, конвертируемого для работы по газодизельному циклу // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2025. № 1 (43).

Original article

Regulation of volumetric gas concentration by disconnecting part of the cylinders of a diesel locomotive engine converted to operate on a gas-diesel cycle

Anatoly G. Siluta¹, Andrey A. Savastenko², Eduard A. Savastenko³

¹Railway Research Institute of JSC Russian Railways "VNIIZHT" Moscow, Russia

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

¹ma.leroy@yandex.ru

²dozentrudn@mail.ru

³e.d.u.a.r.d@inbox.ru

Abstract. In accordance with the key directions of development, including the Concept of the development of the gas engine fuel market in the Russian Federation, Energy and Environmental Strategies, JSC Russian Railways, together with machine-building holdings, is actively involved in the creation of transport equipment using natural gas as motor fuel. A key feature of the power plants of gas-thermal locomotives is their creation on the basis of diesel analogues, just as it was done 30 years ago on the first prototypes. An analysis of the design features and basic technical characteristics of such engines allows us to conclude that there is insufficient elaboration of bottlenecks that occur when transferring transport diesel engines to work on the gas-diesel cycle. This article examines the causes of unstable operation of diesel-diesel power plants of diesel locomotives at low loads and idle, and theoretically substantiates the possibility of quantitative regulation of the volume concentration of gas in the engine cylinders by disconnecting part of the cylinders to ensure guaranteed ignition of the mixed fuel, taking into account restrictions on torque, maximum exhaust gas temperature and maximum combustion pressure of the cycle.

Keywords: volumetric gas concentration, cylinder shutdown, diesel cycle, diesel locomotive, internal combustion engine

For citation: Siluta A.G., Savastenko A.A., Savastenko E.A., Regulation of volumetric gas concentration by disconnecting part of the cylinders of a diesel locomotive engine converted to operate on a gas-diesel cycle. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura.* 2025. No. 1 (43).

Введение

Согласно Транспортной стратегии Российской Федерации [1] и Соглашению между производителями тягового подвижного состава в лице АО «ТМХ» и АО «СТМ», ПАО «Газпром» и ОАО «РЖД» [2] создаются

опытные образцы тягового подвижного состава, использующего в качестве моторного топлива сжиженный природный газ. В качестве двигателей для новых локомотивов будут применяться вновь создаваемые газопоршневые и газодизельные двигатели, создаваемые на основе дизельных прототипов. Находящийся в эксплуатации парк локомотивов будет постепенно заменяться на газомоторные локомотивы путем поставки новых или проведению глубокой модернизации для работы по газодизельному циклу. Принимая во внимание имеющийся опыт проектирования, создания, испытаний и опытной эксплуатации опытных газомоторных локомотивов, следует отметить, что создаваемые вновь газодизельные двигатели железнодорожного назначения имеют те же недостатки, что и 30 лет назад.

1. Оценка области устойчивого воспламенения смеси в цилиндре двигателя при реализации газодизельного цикла

В качестве примера приведем запущенные в опытную эксплуатацию локомотивы серии ТЭМ18Г №№001 и 002, оснащенные двигателем типа Д50, переоборудованного для работы по газодизельному циклу. С 5 по 8 позицию контроллера машиниста (с 50 до 100 % от номинальной мощности двигателя) тепловоз осуществлял работу по газодизельному циклу. С 0 (режим холостого хода) по 4 позицию контроллера машиниста работа осуществлялась на традиционном дизельном топливе, так как не обеспечивалось гарантированное воспламенение топливно-воздушной смеси в цилиндрах двигателя.

Для оценки возможности гарантированного воспламенения смесового топлива необходимо знать состав смесового топлива для определения нижнего и верхнего концентрационного предела распространения пламени (далее НКПР и ВКПР соответственно) и рассчитать фактическое значение объемной концентрации смеси газов.

Для двигателей транспортных установок используется газ типа Б по ГОСТ Р 56021 [3], который представляет собой смесь газов на основе метана,

молярная доля которого составляет не менее 80%. Типичная структура газа природного типа Б имеет следующий состав:

- метан – не менее 90 %;
- этан – не более 4 %;
- пропан – не более 2 %;
- бутан – не более 1 %;
- пентан – не более 1 %;
- азот и другие газы – не более 2 %.

Для вычисления значений НКПР и ВКПР воспользуемся известной формулой ле Шателье для смеси газов:

$$\delta_H = \frac{100}{\frac{\omega_1}{\delta_{H1}} + \frac{\omega_2}{\delta_{H2}} + \dots + \frac{\omega_n}{\delta_{Hn}}} \quad (1)$$

$$\delta_B = \frac{100}{\frac{\omega_1}{\delta_{B1}} + \frac{\omega_2}{\delta_{B2}} + \dots + \frac{\omega_n}{\delta_{Bn}}} \quad (2)$$

где δ_H , δ_B – нижний и верхний концентрационные пределы распространения пламени смеси газов, $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ – доля каждого компонента в смеси газов; $\delta_{H1}, \delta_{H2}, \dots, \delta_{Hn}$ и $\delta_{B1}, \delta_{B2}, \dots, \delta_{Bn}$ – нижний и верхний концентрационные пределы распространения пламени отдельного компонента в смеси газов.

Принимая НКПР И ВКПР отдельных компонентов в соответствии со справочной литературой, имеем:

$$\delta_H = \frac{100}{\frac{90}{4,4} + \frac{4}{2,5} + \frac{2}{1,7} + \frac{1}{1,4} + \frac{1}{1,4} + \frac{2}{2,3}} = 3,917 \quad (3)$$

$$\delta_B = \frac{100}{\frac{90}{17} + \frac{4}{15,5} + \frac{2}{10,9} + \frac{1}{9,3} + \frac{1}{7,8} + \frac{2}{12,1}} = 16,295 \quad (4)$$

Фактические значения объемной концентрации газа для тепловозов ТЭМ18Г-001 были получены с использованием методики, приведенной в работе [8]. Результаты расчетов приведены на рисунке 1.

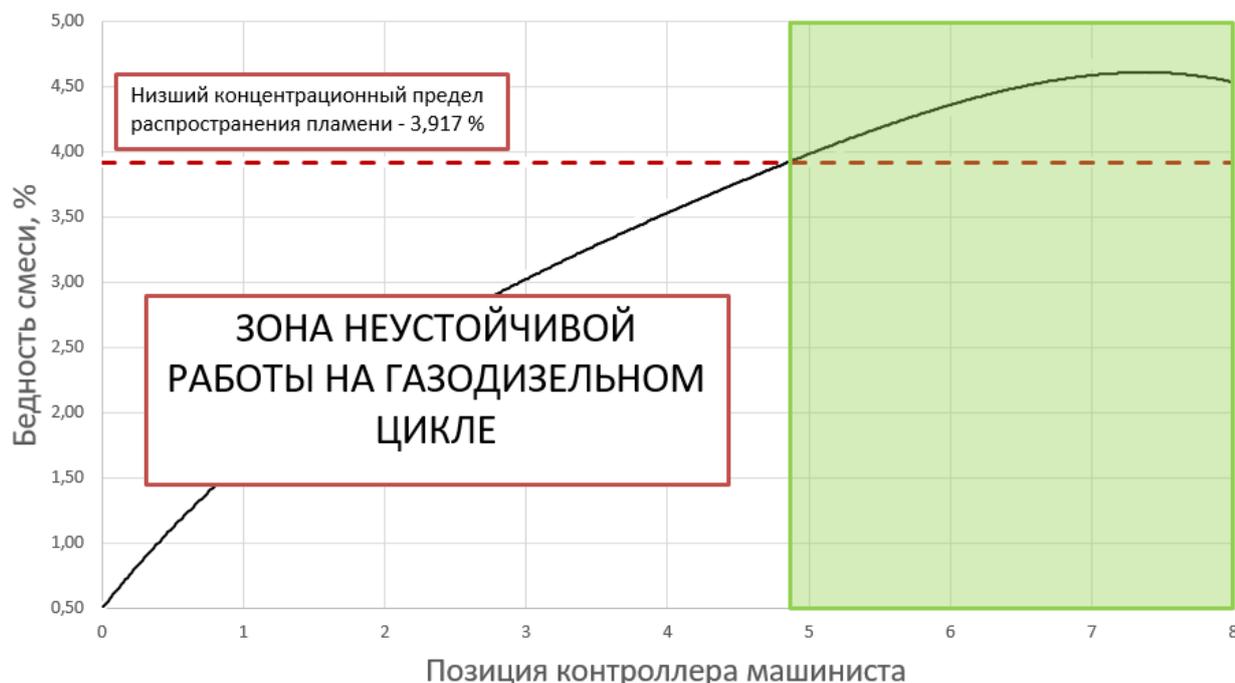


Рис. 1. Результаты расчета объемной концентрации газа

Из рисунка 1 можно сделать важный вывод – работа ниже 5 позиции контроллера машиниста (50 % от номинальной мощности двигателя) не была обеспечена в связи с неудовлетворительным значением объемной концентрации газа в цилиндрах двигателя.

2. Анализ возможности регулирования объемной концентрации газа отключением части цилиндров при конвертации двигателя на работу по газодизельному циклу

Потенциальным нереализованным в базовой конструкции и настройке двигателя резервом для увеличения объемной концентрации газа до уровня НКПР является применение дросселирование воздуха на входе в

двигатель [8, 9] и отключение части цилиндров двигателя при сохранении его мощности, что достигается перераспределением и увеличением подачи топлива в активные (не отключенные) цилиндры.

Дополнительное регулирование путем изменения эффективного сечения дроссельной заслонки без отключения части цилиндров позволило обеспечить удовлетворительные значения объемной концентрации газа в размере (при этом температура выхлопных газов не превысила предельное значение):

- для 4 позиции контроллера – 4,059 %;
- для 3 позиции контроллера – 3,950 %.

Перед вычислением возможной достижимой объемной концентрации газа при отключении цилиндров следует провести предварительное исследование возможности отключения цилиндров на отдельных режимах. Научными коллективами и ведущими производственными компаниями для оценки изменений показателей работы двигателей предлагаются разнообразные подходы, которые успешно применяются для регулирования рабочего объема двигателей в зависимости от целевых условий. Наибольший практический интерес имеет методический подход, предложенный научными коллективами ФГАОУ ВО «РУДН» и ФГБОУ ВО «МАДИ» [5-7], адаптированный для двигателей автомобилей и автотракторных средств.

Сущность предлагаемого методического подхода состоит в построении универсальной (многопараметровой) характеристики двигателя в координатах $L_{уд} - n_d$ при работе на всех цилиндрах и при их последовательном отключении. В качестве параметра, изменяющегося при отключении цилиндров, предлагается удельная работа $L_{уд}$, выполняемая цилиндром. При этом мощность двигателя, его крутящий момент, общая выполняемая работа остаются неизменными.

Удельная работа, выполняемая цилиндром, определяется по следующей зависимости:

$$L_{уд} = \frac{L_{полн}}{i \cdot V_h} \quad (5)$$

где $L_{полн}$ – полная работа, выполняемая цилиндрами двигателя, i – число цилиндров полноразмерного двигателя, V_h – рабочий объем одного цилиндра. При отключении цилиндров число цилиндров меняется с i до z , тогда удельная работа определяется соотношением:

$$L_{уд} = \frac{L_{полн}}{z \cdot V_h} \quad (6)$$

где z – число не отключенных (активных) цилиндров.

В соответствии с предлагаемым подходом для двигателя железнодорожного исполнения типа Д50 были построены характеристики работы двигателя, а именно – крутящий момент, максимальное давление сгорания цикла и максимальная температура выхлопных газов в координатах $L_{уд} - n_d$.

На рисунках 2-4 приведены соответственно зависимости крутящего момента, температуры выхлопных газов и максимального давления сгорания цикла в координатах $L_{уд} - n_d$. Ограничения (выделены жирной красной линией) взяты по данным ТУ на двигатель и паспортных испытаний.

Таким образом, исходя из условия сохранения мощности двигателя, его крутящего момента и не превышения предельных параметров (максимального давления сгорания цикла и предельной температуры газов перед турбиной):

- при работе на 6 цилиндрах ограничения отсутствуют;
- при работе на 5 активных цилиндрах возможна работа на 0-6 позициях контроллера машиниста (на 7-8 позиции контроллера значения крутящего момента, температуры выхлопных газов и максимальное давление сгорания цикла выше предельных значений);

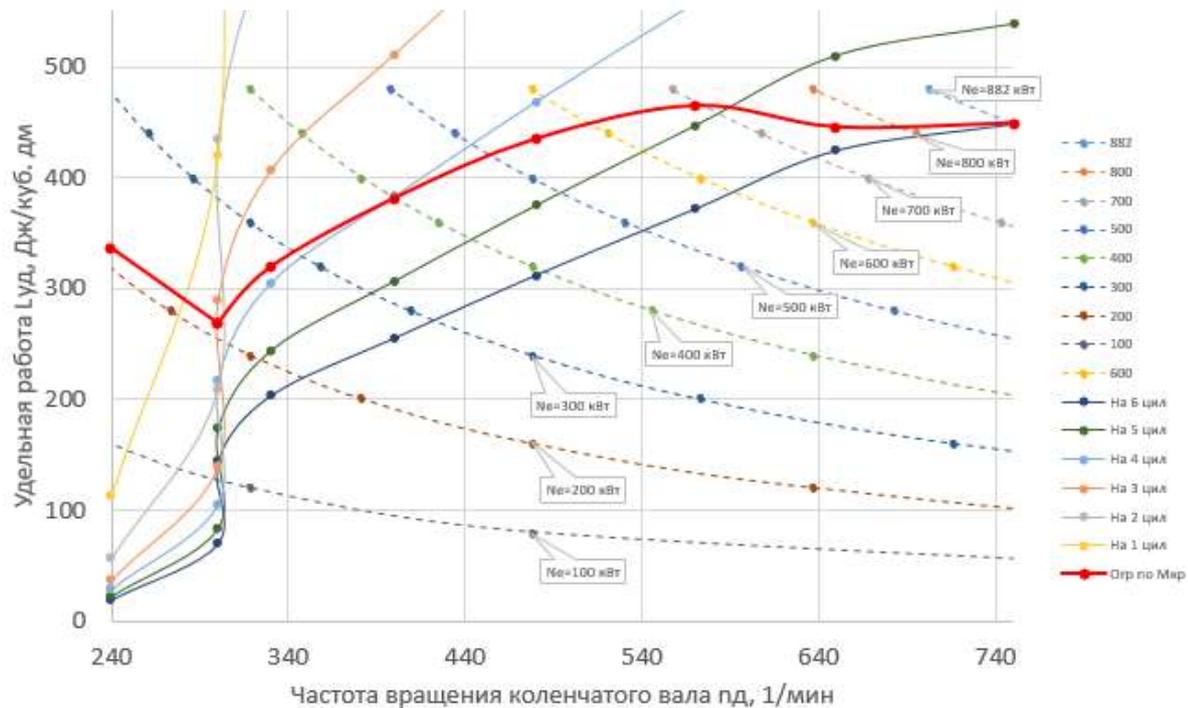


Рис. 2. Крутящий момент при работе на 6, 5, 4, 3, 2 и 1 цилиндрах в координатах $L_{уд} - n_d$

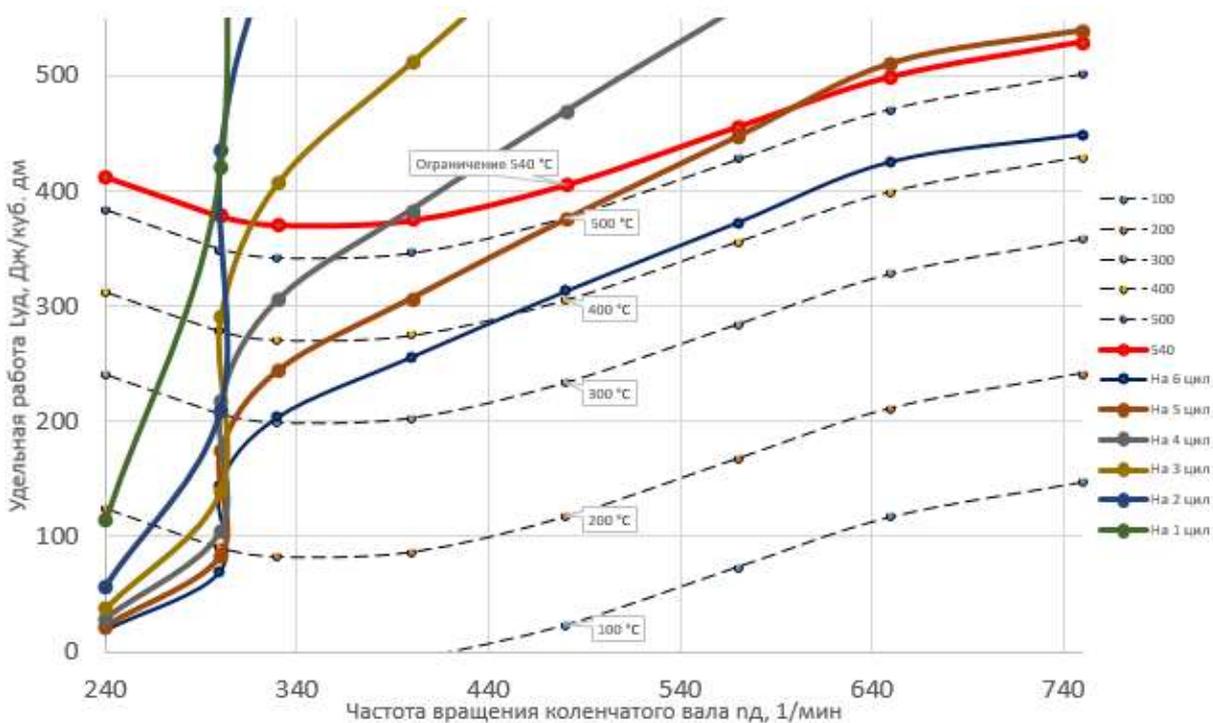


Рис. 3. Температура выхлопных газов при работе на 6, 5, 4, 3, 2 и 1 цилиндрах в координатах $L_{уд} - n_d$

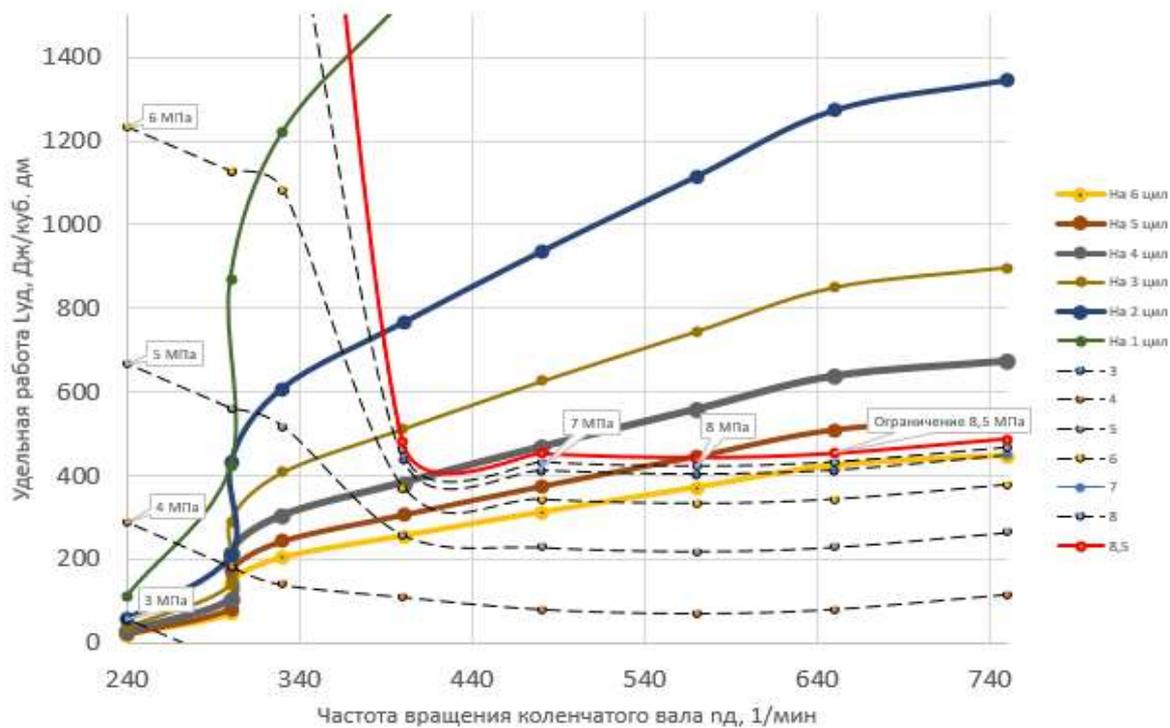


Рис. 4. Максимальное давление сгорания цикла при работе на 6, 5, 4, 3, 2 и 1 цилиндрах в координатах $L_{уд} - n_d$

- при работе на 4 активных цилиндрах возможна работа на 0-4 позициях контроллера машиниста (на 5-8 позиции контроллера значения крутящего момента, температуры выхлопных газов и максимальное давление сгорания цикла выше предельных значений);
- при работе на 3 активных цилиндрах возможна работа на 0-1 позициях контроллера машиниста (на 2-8 позиции контроллера значения крутящего момента, температуры выхлопных газов и максимальное давление сгорания цикла выше предельных значений);
- при работе на 2 активных цилиндрах возможна работа на 0-1 позициях контроллера машиниста (на 2-8 позиции контроллера значения крутящего момента, температуры выхлопных газов и максимальное давление сгорания цикла выше предельных значений);
- при работе на 1 активном цилиндре возможна работа на 0 позиции контроллера машиниста (на 1-8 позициях контроллера значения крутящего момента, температуры выхлопных газов и максимальное давление сгорания цикла выше предельных значений), т.е. только на режиме холостого хода

двигателя с минимально допустимой частотой вращения коленчатого вала двигателя.

Проведенные расчеты фактического значения объемной концентрации газа с учетом полученных ограничений по крутящему моменту, максимальной температуре выхлопных газов и максимальному давлению сгорания цикла, влияющих на число активных цилиндров двигателя в зависимости от режима работы, показали, что:

- на 2 позиции контроллера следует реализовать работу на 4 активных цилиндрах (объемная концентрация газа составляет 4,47 %);
- на 1 позиции контроллера следует реализовать работу на 2 или 1 активном цилиндрах (объемная концентрация газа составляет 4,08-4,59 %);
- на 0 позиции контроллера (холостом ходу) следует реализовать работу на 1 активном цилиндре (объемная концентрация газа составляет 9,929 %).

Выводы и рекомендации

1. Теоретически обоснованы пределы отключения части цилиндров (работы двигателя на части активных цилиндров) для двигателей железнодорожного назначения с учетом ограничений по крутящему моменту, температуре выхлопных газов и максимальному давлению сгорания цикла. На частичных режимах (2 и 1 позиции) и холостом ходу возможно обеспечение объемной концентрации газа не менее 3,917 % (от 4,08 % до 9,93 %) при отключении части цилиндров (на 2 позиции – отключение 2 цилиндров, на 1 позиции – отключение 4 или 5 цилиндров, на режиме холостого хода – отключение 5 цилиндров).

2. Регулирование рабочего объема двигателей может быть использовано в качестве инструмента количественного регулирования объемной концентрации газа для обеспечения гарантированного воспламенения смесового топлива в двигателях, конвертируемых на работу по газодизельному циклу. При этом температура газов перед турбиной не превысила предельное допустимое значение 540 град. С, максимальное давление сгорания цикла не превысило предельное допустимое значение 8,5 МПа, а значения крутящего момента для каждого из режимов не изменились.

3. Рекомендуется использование предложенных подходов при проведении предварительных расчетов, проектировании и доводке газодизелей транспортных средств, создаваемых на базе дизельных аналогов.

Список источников

1. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года, утвержденная распоряжением Правительства РФ от 27 ноября 2021 г. № 3363-р.
2. Соглашение о сотрудничестве между ПАО «Газпром», ОАО «Российские железные дороги», АО «Группа Синара» и ЗАО «Трансмашхолдинг» в области использования природного газа в качестве моторного топлива. №75 от 17 июня 2016 г. (актуализация на 2024 год).
3. ГОСТ Р 56021-2014 Газ горючий природный сжиженный. Топливо для двигателей внутреннего сгорания и энергетических установок. Технические условия.
4. Журавлев, А. Н. Повышение эффективности работы тепловозного газодизеля путем регулирования соотношения воздуха и топлива в цилиндрах: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Журавлев Андрей Николаевич, 2022. – 123 с. – EDN JMQDJB.
5. Савастенко, Э. А. Регулирование двигателя с искровым зажиганием изменением его рабочего объема : специальность 05.04.02 "Тепловые двигатели" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Савастенко Эдуард Андреевич. – Москва, 2016. – 22 с. – EDN ZQBMDR.
6. Методика расчёта характеристик бензинового двигателя и дизеля с отключаемыми цилиндрами / А. А. Савастенко, И. В. Алексеев, И. Е. Иванов [и др.] // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2018. – № 2(53). – С. 30-37. – EDN USSOJX.
7. Патрахальцев, Н. Н. Повышение экономичности режимов малых нагрузок дизеля КАМАЗ-740 путем изменения его рабочего объема / Н. Н. Патрахальцев, И. А. Никишин, И. А. Петруня // Грузовик. – 2013. – № 5. – С. 31-34. – EDN GLFDZJ.
8. Пути решения проблемы перевода тепловозов на газообразное топливо / Е. Е. Коссов, В. В. Асабин, А. Г. Силюта [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2021. – Т. 80, № 4. – С. 191-200. – DOI 10.21780/2223-9731-2021-80-4-191-200. – EDN ANAJZD.
9. Журавлев, А. Н. Особенности организации рабочего процесса газодизельного двигателя тепловоза / А. Н. Журавлев // Вестник транспорта Поволжья. – 2022. – № 4(94). – С. 7-13. – EDN GIGFYT.

References

1. *Transportnaya strategiya Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 godar* (The transport strategy of the Russian Federation until 2030 with a

forecast for the period up to 2035), approved by the Decree of the Government of the Russian Federation dated November 27, 2021 No. 3363-р.

2. Soglasheniye o sotrudnichestve mezhdu PAO «Gazprom», OAO «Rossiyskiye zheleznyye dorogi», AO «Gruppa Sinara» i ZAO «Transmashholding» v oblasti ispol'zovaniya prirodnogo gaza v kachestve motornogo topliva (Agreement on cooperation between Gazprom PJSC, Russian Railways JSC, Sinara Group JSC and Transmashholding CJSC in the field of using natural gas as a motor fuel), no. 75, 2016 (updated for 2024).

3. Gaz goryuchiy prirodnyy szhizhenyyu. Topливо dlya dvigateley vnutrennego sgoraniya i energeticheskikh ustanovok. Tekhnicheskiye usloviya GOST R 56021-2014 (Natural liquefied combustible gas. Fuel for internal combustion engines and power plants. Technical conditions GOST R 56021-2014).

4. Zhuravlev A.N. Povysheniye effektivnosti raboty teplovoznogo gazodizelya putem regulirovaniya sootnosheniya vozdukhа i topliva v tsilindrakh (Improving the efficiency of diesel diesel locomotives by regulating the ratio of air and fuel in cylinders), Candidate's thesis, Moscow, 2022, 123 p.

5. Savastenko E.A. Regulirovaniye dvigatelya s iskrovym zazhiganiyem izmeneniyem yego rabocheho ob'yoma (Regulation of an engine with spark ignition by changing its working volume), abstract of a Candidate's thesis, Moscow, 2016, 22 p.

6. Savastenko A.A., Alekseyev I.V., Ivanov I.Ye., Yakovenko A.L., Savastenko E.A. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)*, 2018, no. 2(53), pp. 30-37.

7. Patrakhal'tsev N.N., Nikishin I.A., Petrunya I.A. *Gruzovik*, 2013, no. 5, pp. 31-34.

8. Kossov Ye.Ye., Asabin V.V., Silyuta A.G., Zhuravlev A.N., Kossova L.Ye. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta*, 2021, vol. 80, no. 4, pp. 191-200.

9. Zhuravlev A.N. *Vestnik transporta Povolzh'ya*, 2022, no. 4(94), pp. 7-13.

Рецензент: В.В. Синявский, канд. техн. наук, доц., МАДИ

Информация об авторах

Силута Анатолий Геннадьевич, канд. техн. наук, начальник отдела, АО «ВНИИЖТ».

Савастенко Андрей Александрович, канд. техн. наук, доц., МАДИ.

Савастенко Эдуард Андреевич, канд. техн. наук, доц., МАДИ.

Information about the authors

Siluta Anatoly G., Candidate of Sciences (Technical), Head of the Department, "VNIIZHT".

Savastenko Andrey A., Candidate of Sciences (Technical), associate professor, MADI.

Savastenko Eduard A., Candidate of Sciences (Technical), associate professor, MADI.

Статья поступила в редакцию 10.02.2025; одобрена после рецензирования 10.02.2025; принята к публикации 21.03.2025.

The article was submitted 10.02.2025; approved after reviewing 10.01.2025; accepted for publication 21.05.2025.