


ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.372:502.4

DOI: 10.26897/2687-1149-2021-4-28-32

**ОПТИМИЗАЦИЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ ГАЗОДИЗЕЛЯ
КАК МЕТОД УЛУЧШЕНИЯ ЕГО ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК****ЧУМАКОВ ВАЛЕРИЙ ЛЕОНИДОВИЧ** , канд. техн. наук, профессор¹valery.chumakov@gmail.com **ДЕВЯНИН СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ**, д-р техн. наук, профессор¹devta@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6776-0432>**БИЖАЕВ АНТОН ВЛАДИСЛАВОВИЧ**, канд. техн. наук, старший преподаватель¹

a.bizhaev@mail.ru

КАПУСТИН АЛЕКСАНДР ВАСИЛЬЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент²

aleksandr.kapustin@novsu.ru

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, Российская Федерация, г. Москва, Тимирязевская ул., 49² Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого; 173003, Российская Федерация, г. Великий Новгород, Большая Санкт-Петербургская ул., 41

Аннотация. В статье представлены предложения по улучшению экологических характеристик дизеля при использовании газообразного углеводородного топлива и организации работы двигателя по газодизельному циклу. Исследованы возможности снижения выбросов токсичных компонентов с отработавшими газами газодизеля, работающего на сжиженных пропан-бутановых смесях. Эксперименты, проведенные в диапазоне изменения нагрузки от 10 до 100% и частот вращения 1400...2000 об/мин, показали, что газодизель обеспечивает достаточно высокий уровень замещения дизельного топлива газовыми смесями. Указаны основные направления уменьшения выбросов токсичных компонентов отработавших газов за счет оптимизации регулирования двигателя: изменение мощности двигателя при воздействии на подачу топлива, газа и дросселирование воздушного заряда на впуске. Регулирование обеспечивает обогащение первых сгорающих порций для снижения оксидов азота и сохранение обеднения основного заряда в пределах воспламеняемости газозоообразного заряда для уменьшения окиси углерода и углеводородов. Установлено, что при переходе на работу по газодизельному циклу «качественное» регулирование мощности только за счет подачи газа обеспечивает снижение выбросов оксидов азота газодизелем по сравнению с дизелем практически во всем диапазоне нагрузки. При высоких нагрузках (более 80%) обеспечивается стабильная работа двигателя при замещении 90% дизельного топлива на газ. При этом во всем диапазоне нагрузки концентрация оксидов азота уменьшается не менее чем на 15...20% по сравнению с дизелем. Однако отмечается повышенный выброс углеводородов и окиси углерода с отработавшими газами. Экспериментальными исследованиями установлено, что оптимизация параметров регулирования газодизеля позволяет снизить массовый выброс оксидов азота с отработавшими газами в 2...3 раза и многократно уменьшить выброс продуктов неполного сгорания – окиси углерода и углеводородов. Подтверждена гипотеза о возможности улучшения экологических характеристик дизеля при использовании газообразного углеводородного топлива и организации работы двигателя по газодизельному циклу.


Ключевые слова: газодизель, токсичность, рабочий процесс, экспериментальные исследования, уменьшение выбросов оксидов азота, оксидов углерода и углеводородов.

Формат цитирования: Чумаков В.Л., Десянин С.Н., Бижаев А.В., Капустин А.В. Оптимизация регулирования газодизеля как метод улучшения его экологических характеристик // Агроинженерия. 2021. № 4(104). С. 28-32. DOI: 10.26897/2687-1149-2021-4-28-32.

© Чумаков В.Л., Десянин С.Н., Бижаев А.В., Капустин А.В., 2021



ORIGINAL PAPER

**OPTIMIZATION OF GAS-DIESEL ENGINE REGULATION
AS A METHOD OF IMPROVING ITS ECOLOGICAL CHARACTERISTICS****VALERIY L. CHUMAKOV** , PhD (Eng), Professor¹valery.chumakov@gmail.com **SERGEI N. DEVIANIN**, DSc (Eng), Professor¹devta@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6776-0432>

ANTON V. BIZHAEV, PhD (Eng), Assistant Professor¹

a.bizhaev@mail.ru

ALEKSANDR V. KAPUSTIN, PhD (Eng), Associate Professor²

aleksandr.kapustin@novsu.ru

¹ Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev; 49, Timiryazevskaya str., Moscow, 127434, Russian Federation

² Yaroslavl-the-Wise Novgorod State University; 41, Bolshaya Sankt-Peterburgskaya Str., Veliky Novgorod, 173003, Russian Federation

Abstract. The paper shows some ways to improve the environmental characteristics of a diesel engine using gaseous hydrocarbon fuel and operating the engine in a gas-diesel cycle mode. Some possibilities to reduce toxic components of exhaust gases in a gas-diesel engine operating on liquefied propane-butane mixtures have been studied. Experiments carried out in a wide range of load from 10 to 100% and speed from 1400 to 2000 rpm showed that the gas-diesel engine provides a sufficiently high level of diesel fuel replacement with gas hydrocarbon fuel. The authors indicate some effective ways to reduce the toxicity of exhaust gases. The engine power should be adjusted by the simultaneous supply of fuel, gas and throttling the air charge in the intake manifold. This method enriches the first combusting portions to reduce nitrogen oxides and maintains the depletion of the main charge within the flammability limits of the gas-air charge to reduce carbon monoxide and hydrocarbons. The authors found that when the engine operates in a gas-diesel cycle mode, the power change provides a decrease in nitrogen oxide emissions of gas-diesel fuel only due to gas supply in almost the entire load range as compared to the pure diesel. At high loads (more than 80%) stable engine operation is ensured up to 90% of diesel fuel replaced by gas. Even at 10% of diesel fuel used the concentration of nitrogen oxides decreases by at least 15...20% as compared with a diesel engine in the entire load range. However, there is an increased emission of hydrocarbons and carbon monoxide in the exhaust gases. Further experimental studies have shown that optimization of the gas diesel regulation can reduce the mass emission of nitrogen oxides contained in exhaust gases in 2...3 times and greatly reduce the emission of incomplete combustion products – carbon monoxide and hydrocarbons.

Key words: gas-diesel engine, toxicity, workflow, experimental research, reduced emission of nitrogen oxides, carbon oxides and hydrocarbons.

For citation: Chumakov V.L., Devianin S.N., Bizhaev A.V., Kapustin A.V. Optimization of gas-diesel engine regulation as a method of improving its ecological characteristics. *Agricultural Engineering*, 2021; 4 (104): 28-32. (In Rus.). DOI: 10.26897/2687-1149-2021-4-28-32.

Введение. Развитие современного дизелестроения в настоящее время сталкивается с серьезными вызовами, связанными с ужесточением требований к экологическим характеристикам новых моделей. Последние нормы «Евро-6» делают особый акцент на снижении выбросов оксидов азота с отработавшими газами. В зарубежных странах неоднократно выражалось мнение о необходимости сокращения зон эксплуатации дизелей, ограничения их производства и возможного полного прекращения выпуска. Большинство экономически развитых стран изучают различные направления решения данной проблемы¹ [1].

Для стран, обладающих значительными ресурсами нефтяного и газового сырья, такие требования не могут считаться приемлемыми. Многие исследователи пытаются решить эту проблему теоретическими расчётами и экспериментами применительно к традиционным² или альтернативным топливам [2, 3]. В ряде случаев данные этих исследований являются противоречивыми, но тем не менее указывают на возможности улучшения экологических характеристик дизеля при использовании газообразного углеводородного топлива и организации работы двигателя по газодизельному циклу.

Цель исследования: выявить возможности улучшения экологических характеристик дизеля при использовании газообразного углеводородного топлива и организации работы двигателя по газодизельному циклу.

Материал и методы. В статье представлены некоторые результаты исследований работы двухцилиндрового двигателя воздушного охлаждения Д-120 (используемого на тракторах моделей ВТЗ Т-30, АГРОМАШ Т-30ТК, АГРОМАШ Т-30СШ ...) при организации его работы по газодизельному циклу на сжиженных пропан-бутановых смесях.

Результаты расчётных исследований, выполненных авторами ранее по модели рабочего цикла двигателя с расслоенным зарядом [4], показали, что расчётная модель образования окиси азота с учётом расслоения заряда показывает высокую эффективность проведения параметрического анализа для прогнозирования показателей выбросов NO проектируемых двигателей с расслоенным зарядом, например, работающих по газодизельному циклу.

Полученные в расчётах результаты указывают на то, что значительное снижение интенсивности образования оксидов азота в камере сгорания на 40...50% может быть достигнуто при различных схемах расслоения заряда в камере сгорания, то есть при неоднородном распределении топлива в камере сгорания [5]. Теоретически представленная схема расслоения требует экспериментальной реализации и проверки.

На первой стадии экспериментальных исследований организация системы питания двигателя предполагала

¹ Марков В.А., Девианин С.Н., Зыков С.А. и др. Биотоплива для двигателей внутреннего сгорания: Монография. М.: НИЦ «Инженер» (СоюзНИО), 2016. 292 с.

² Максимов А.Л. Расчетная модель действительного цикла двигателя внутреннего сгорания // Труды Московского автомобильно-дорожного института. М.: МАДИ, 1976. С. 74-81.

сохранение базовой системы дизеля при подаче, возможно, малой дозы дизельного топлива. Подача газа проводилась через диффузор во впускном трубопроводе двигателя. Система подачи газа – традиционная для пропан-бутановых смесей: с подогревателем газа и двухступенчатым редуктором для снижения давления газа до атмосферного на уровне впуска во впускной коллектор³.

Простейший способ управления мощностью двигателя, который нашёл применение в ряде моделей газодизеля, – это ограничение подачи дизельного топлива на минимальном уровне в целях воспламенения гомогенной газозвушной смеси, поступающей в цилиндр через впускной трубопровод [6]. Регулирование мощности происходит за счет изменения количества этой газозвушной смеси (так называемое качественное регулирование мощности).

Эксперименты проводились при изменении нагрузки от 10 до 100% от номинальной и в диапазоне частот вращения 1400...2000 об/мин.

Результаты и обсуждение. Результаты испытаний показали, что на высоких нагрузках (более 80%) обеспечивается стабильная работа двигателя при замещении 90% дизельного топлива на газ, то есть при запальных дозах дизельного топлива на уровне 10% от номинальной подачи. При этом во всем диапазоне нагрузки концентрация оксидов азота $NO_{x\text{ГД}}$ уменьшается не менее чем на 15...20% по сравнению с дизелем $NO_{x\text{Д}}$.

Однако работа с малыми подачами дизельного топлива (7...10%) при снижении нагрузки приводит к существенному увеличению удельного расхода топлива, который может достигать более 50% на малых нагрузках. Кроме того, многократно возрастает выброс окиси углерода и углеводородов. Высокая концентрация углеводородов дает основание полагать, что они являются результатом серьезного нарушения процесса распространения фронта пламени по газозвушной смеси в камере сгорания.

На рисунке 1 представлена нагрузочная характеристика газодизеля, работающего до 20%-ной нагрузки за счет подачи «запальной» дозы дизельного топлива, а дальнейшее увеличение нагрузки происходит за счет подачи газа во впускной трубопровод. Представлены средние по двигателю коэффициенты избытка воздуха $\alpha_{\text{Д}}$, рассчитанные по дизельному топливу и газу с учетом их теплоты сгорания, и коэффициенты избытка воздуха по газозвушной смеси $\alpha_{\text{Г}}$, поступающей через впускной трубопровод. Регулирование мощности за счет подачи газа обеспечивает снижение выбросов оксидов азота газодизелем $NO_{x\text{ГД}}$ по сравнению с дизелем $NO_{x\text{Д}}$ практически во всем диапазоне нагрузки. Сгорание на средних нагрузках при качественном регулировании происходит при составах газозвушной смеси, находящихся на пределе (или за пределами) воспламенения пропан-бутановых смесей $\alpha_{\text{Г}} \geq 2,2$, и сопровождается значительным увеличением концентрации окиси углерода $CO_{\text{ГД}}$ и углеводородов $CH_{\text{ГД}}$ по сравнению показателями дизеля $CO_{\text{Д}}$ и $CH_{\text{Д}}$.

Улучшение ситуации возможно, как предполагалось в теоретических расчетах по модели [5], в усилении эффективности горения в переходной зоне заряда, связанной со сгоранием вокруг факела дизельного топлива, либо в повышении коэффициента избытка воздуха газозвушной смеси до пределов эффективного обеднения, обеспечивающего необходимую полноту выгорания газа.

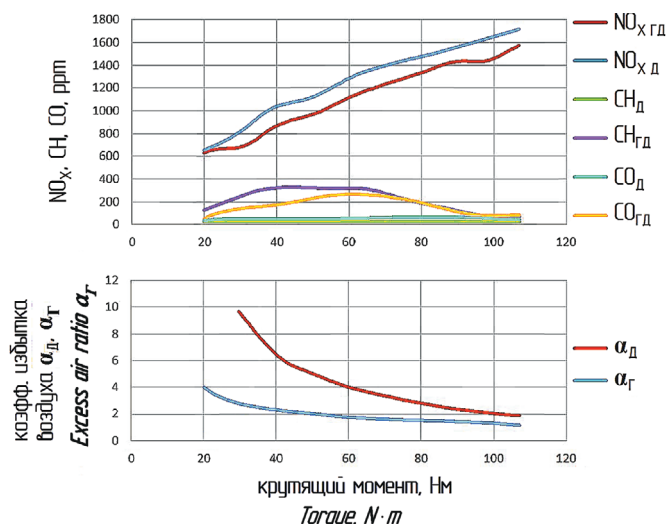


Рис. 1. Концентрации токсичных компонентов дизеля и газодизеля в зависимости от нагрузки при регулировании мощности подачей газа

Fig. 1. Concentrations of toxic components of diesel and gas-diesel fuels, depending on the load when regulating power with gas supply

Последнее предложение было проверено в серии нагрузочных характеристик газодизеля, снятых при дросселировании воздушного потока во впускной трубе за счет установленной там дроссельной заслонки. Закрытие заслонки при прочих равных условиях привело к обогащению газозвушного заряда и улучшению распространения фронта пламени по камере сгорания (рис. 2).

Предельное дросселирование и соответственно снижение коэффициента наполнения цилиндра воздухом η_v определялись на каждом скоростном режиме максимальными критическими давлениями и температурами конца процесса сжатия, при которых было обеспечено стабильное воспламенение запальной дозы дизельного топлива. Сохранение коэффициента избытка воздуха газозвушной смеси в пределах $\alpha_{\text{Г}} < 2,2$ стабилизировало процесс сгорания и снизило концентрацию оксидов углерода и углеводородов соответственно с 280...300 ppm до 50...100 ppm и 20...60 ppm.

Дросселирование воздушного заряда двигателя обеспечивало и вторичный значительный эффект снижения выбросов продуктов неполного сгорания за счет уменьшения массы рабочего тела и соответственно массовых выбросов продуктов сгорания с отработавшими газами. В этих условиях «смешанного» регулирования выбросы NO уменьшались в 2...3 раза, и многократно – для продуктов неполного сгорания (CO и CH) – в зависимости от режима работы (рис. 3).

³ Система питания двигателя внутреннего сгорания: Пат. 35379. Российская Федерация, МПК 7 F 02 B 77/00 / В.Л. Чумаков, М.Г. Мустафаев; заявл.08.07.2003; опубл. 10.01.2004. Бюл № 1. 5 с.

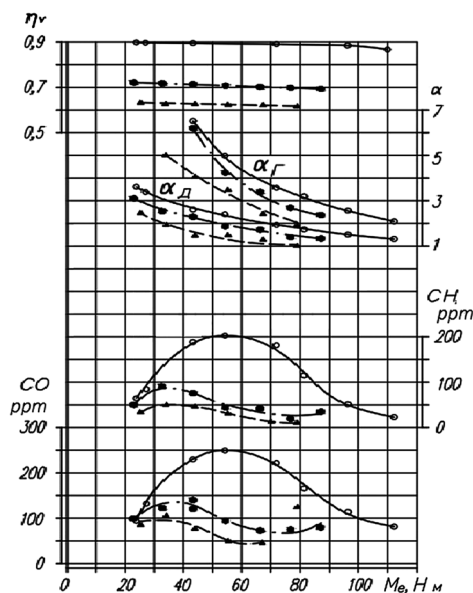


Рис. 2. Изменение концентрации продуктов неполного сгорания CH и CO при дросселировании заряда на впуске:

- — ○ — газодизеля без дросселирования впуска $\eta_v = \eta_{v \max}$;
- — ● — газодизеля с дросселированием впуска $\eta_v = 80\% \eta_{v \max}$;
- ▲ — ▲ — газодизеля с дросселированием впуска $\eta_v = 60\% \eta_{v \max}$

Fig. 2. Change in the concentration of incomplete combustion products (CH and CO) during intake throttling of the charge:

- — ○ — Gas-diesel engine without intake throttling $\eta_v = \eta_{v \max}$;
- — ● — Gas-diesel with intake throttling $\eta_v = 80\% \eta_{v \max}$;
- ▲ — ▲ — Gas-diesel with intake throttling $\eta_v = 60\% \eta_{v \max}$

Выводы

1. Газодизельные модификации двигателей характеризуются более сложной организацией рабочих процессов, что может определять их неудовлетворительные показатели по сравнению с базовыми дизелями.

2. Создание газодизельных модификаций требует более серьезного подхода к модернизации конструктив-

Библиографический список

1. Devyanin S.N., Kovalenko V.P., Ulyukina E.A. et al. Prospects for the operation of agricultural machinery on compressed natural gas. *Autogas filling complex + Alternative fuel*. 2017. Vol. 16. No. 7. P. 313-315.
2. Ерохин М.Н., Девянин С.Н., Чумаков В.Л. и др. Экологическая безопасность применения биотоплив в дизелях // Вестник Орловского государственного аграрного университета. 2008. № 5 (14). С. 27-29.
3. Девянин С.Н., Чумаков В.Л., Марков В.А. и др. Использование биогаза в качестве топлива для дизелей // Грузовик. 2011. № 11. С. 32-43.
4. Бижаев А.В., Чумаков В.Л., Путан А.А. Расчётная модель основных параметров рабочего цикла дизеля с использованием различных типов топлив // Доклады ТСХА. 2020. № 2. С. 244-247.
5. Chumakov V.L., Devyanin S.N., Bijaev A.V. Nitrogen oxide formation with nonuniform fuel distribution in diesel engine. *Journal of Physics: Conference Series* 1679 (2020) 052089. DOI:10.1088/1742-6596/1679/5/052089.

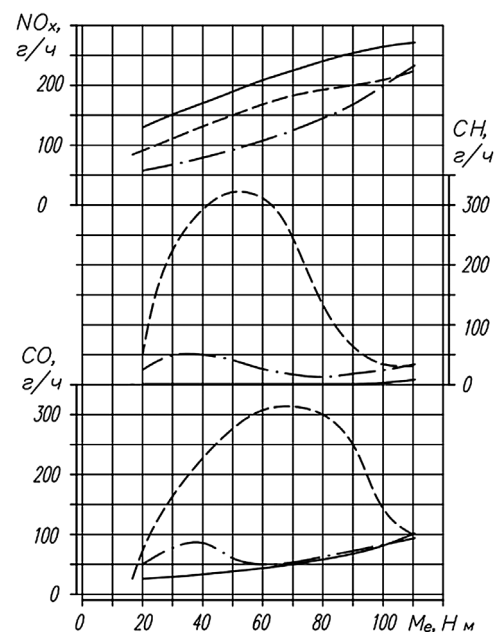


Рис. 3. Сравнение расчетных массовых выбросов NO_x , CH и CO дизеля (—), газодизеля без дросселирования впуска (---), газодизеля с дросселированием впуска (-.-.-)

Fig. 3. Comparing the calculated mass emissions of NO_x , CH and CO of a diesel engine (—), gas diesel without intake throttling (---), gas diesel with intake throttling (-.-.-)

ных изменений двигателя и оптимизации его регулирования.

3. Оптимизация параметров регулирования газодизеля обеспечивает снижение массовых выбросов оксидов азота с отработавшими газами в 2...3 раза и значительное многократное уменьшение выбросов продуктов неполного сгорания – окиси углерода и углеводов.

References

1. Devyanin S.N., Kovalenko V.P., Ulyukina E.A. et al. Prospects for the operation of agricultural machinery on compressed natural gas. *Autogas refueling complex + Alternative fuel*, 2017; 16; 7: 313-315. (In Rus.)
2. Erokhin M.N., Devyanin S.N., Chumakov V.L. and other *Ekologicheskaya bezopasnost' primeneniya biotopliv v dizelyakh* [Environmental safety of the use of biofuels in diesel engines]. *Vestnik Orlovskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2008; 5 (14): 27-29. (In Rus.)
3. Devyanin S.N., Chumakov V.L., Markov V.A. et al. *Ispol'zovanie biogaza v kachestve topliva dlya dizeley* [Use of biogas as fuel for diesel engines]. *Gruzovik*, 2011; 11: 32-43. (In Rus.)
4. Bizhaev A.V., Chumakov V.L., Putan A.A. *Rashchetnaya model' osnovnykh parametrov rabocheho tsikla dizelya s ispol'zovaniem razlichnykh tipov topliv* [Calculation model of the main parameters of the diesel engine operating cycle using various types of fuels]. *Doklady TSKHA*, 2020; 2: 244-247. (In Rus.)

6. Чумаков В.Л., Бижаев А.В., Путан А.А. Снижение выбросов оксидов азота с отработавшими газами газодизеля // Сб. трудов конференции «Чтения академика В.Н. Болтинского (115 лет со дня рождения)». Под ред. М.Н. Ерохина. 2019. С. 118-122.

Критерии авторства

Чумаков В.Л., Девянин С.Н., Бижаев А.В., Капустин А.В. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов провели эксперимент и подготовили рукопись. Чумаков В.Л., Девянин С.Н., Бижаев А.В., Капустин А.В. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 14.04.2021

Одобрена после рецензирования 10.06.2021

Принята к публикации 11.06.2021

5. Chumakov V.L., Devyanin S.N., Bijaev A.V. Nitrogen oxide formation with nonuniform fuel distribution in diesel engine. *Journal of Physics: Conference Series* 1679 (2020) 052089 IOP Publishing DOI:10.1088/1742-6596/1679/5/052089.

6. Chumakov V.L., Bizhaev A.V., Putan A.A. Snizhenie vybrosov oksidov azota s otrabotavshimi gazami gazodizelya [Reducing emissions of nitrogen oxides with exhaust gases of gas diesel]. *Sb. trudov konferentsii "Chteniya akademika V.N. Boltinskogo (115 let so dnya rozhdeniya)"*. Ed. by M.N. Erokhin, 2019: 118-122. (In Rus.)

Contribution

V.L. Chumakov, S.N. Devyanin, A.V. Bizhaev, A.V. Kapustin performed theoretical studies, and based on the results obtained, conducted the experiment and wrote the manuscript. V.L. Chumakov, S.N. Devyanin, A.V. Bizhaev, A.V. Kapustin have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The paper was received 14.04.2021

Approved after reviewing 10.06.2021

Accepted for publication 11.06.2021