

Система подачи воды в отработавшие газы газодизельного двигателя

Е. В. Овчинников[✉], научный сотрудник лаборатории «Технологий и машин для посева и уборки зерна и семян в селекции и семеноводстве»

С. Ю. Уютов, младший научный сотрудник лаборатории «Автоматизированного привода сельскохозяйственной техники»

М. Е. Чаплыгин, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории «Технологий и машин для посева и уборки зерна и семян в селекции и семеноводстве»

ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ)

109428 г. Москва 1-й Институтский пр-д, д 5

[✉]evo-xpro-info@yandex.ru

Резюме. В исследовании рассматривали вопрос использования впрыска воды в отработавшие газы газодизельного двигателя для снижения детонационного горения газомоторного топлива и снижения оксидов азота в отработавших газах. Объектом исследования стал дизельный двигатель Минского моторного завода ММЗ Д-243, оснащенный системой подачи газомоторного топлива сжиженного углеводородного газа (СУГ) для работы в газодизельном режиме, а также впрыск воды в систему рециркуляции отработавших газов. Часть отработавших газов отводилась от выпускного коллектора разветвителем, а затем попадали в специальную камеру, в которую впрыскивалась вода в отработавшие газы, оснащенную теплообменником. В зависимости от режимов работы газодизельного двигателя количество впрыскиваемой воды и открытие дроссельной заслонки регулировалось блоком управления. Первоначально стандартные значения двигателя были получены путем проведения испытаний на дизельном топливе, затем на газодизельном топливе по тем же режимам, а после этого на газодизельном режиме со впрыском воды. При подаче воды в отработавшие газы сокращение запальной дозы дизельного двигателя составило 7 % и достигло 18 % от общей подачи, количество вредных выбросов оксидов азота NO_x составило в среднем 21 %. Существенных изменений в выбросах отработавших газов CO не произошло, а выбросы углеводородов HC незначительно увеличились (8 %), дымность снизилась на 3 %. При использовании газомоторного топлива на режимах максимальной мощности произошло повышение характеристик основных показателей двигателя в среднем на 7 % относительно дизельного топлива.

Ключевые слова: система рециркуляции, газодизельный двигатель, система подачи воды, экологические показатели

Для цитирования: Овчинников Е. В., Уютов С. Ю., Чаплыгин М. Е. Система подачи воды в отработавшие газы газодизельного двигателя // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2025. №1 (69). С. 186-192. doi:10.18286/1816-4501-2025-1-186-192

Water supply system for exhaust gases of a gas-diesel engine

E. V. Ovchinnikov[✉], **S. Yu. Uytov**, **M. E. Chaplygin**

FSBSI Federal Scientific Agroengineering Center VIM

109428 Moscow, 1st Institutsky Drive, Bldg. 5

[✉]evo-xpro-info@yandex.ru

Abstract. The study considered the issue of using water injection into the exhaust gases of a gas-diesel engine to reduce detonation combustion of gas motor fuel and reduce nitrogen oxides in the exhaust gases. The object of the study was a diesel engine of Minsk Motor Plant MMZ D-243, equipped with a system for supplying gas motor fuel of liquefied petroleum gas (LPG) for operation in the gas-diesel mode, as well as water injection into the exhaust gas recirculation system. Part of the exhaust gases was diverted from the exhaust manifold by a splitter, and then entered a special chamber into which water was injected into the exhaust gases, equipped with a heat exchanger. Depending on the operating modes of the gas-diesel engine, the amount of injected water and the opening of the throttle valve were regulated by the control unit. Initially, the standard engine values were obtained by conducting tests on diesel fuel, then on gas-diesel fuel in the same modes, and then in the gas-diesel mode with water injection. When water was supplied to the exhaust gases, the reduction in the ignition dose of the diesel engine was 7% and reached 18% of the total supply, the amount of harmful emissions of nitrogen oxides NO_x was on average of 21%. There were no significant changes in exhaust gas emissions, CO , and hydrocarbon HC emissions increased slightly (8%), smoke decreased by 3%. When using gas motor fuel in maximum power modes, there was an increase in the characteristics of the main engine parameters by an average of 7% in relation to diesel fuel.

Keywords: recirculation system, diesel engine, water supply system, environmental performance.

For citation: Ovchinnikov E. V., Uyutov S. Yu., Chaplygin M. E. Water supply system for exhaust gases of a gas-diesel engine // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2025;1(69): 193-201 doi:10.18286/1816-4501-2025-1-193-201

Введение

Двигатели внутреннего сгорания, а в частности дизельные двигатели широко используются во многих сферах жизнедеятельности, таких как сельское хозяйство, грузовые перевозки, коммунальное хозяйство, пассажирские перевозки и т.д., поскольку они имеют более высокую эффективность и более низкий удельный расход топлива [1, 2]. Однако из-за характеристик сгорания во время работы происходит увеличение количества выбросов оксидов азота (NOx), вызывая острую проблему экологических последствий от их использования [3-5]. Поэтому для того, чтобы снизить негативное воздействие от их использования и соответствовать строгим нормам выбросов, а также повысить эффективность их использования, ученые и исследователи, а также производители двигателей используют различные варианты, такие как возобновляемые источники энергии [6-8], смесевое топливо и многотопливные системы [9-11], сажевые фильтры и катализаторы [12, 13], рециркуляция отработавших газов [14-16], изменение угла подачи топлива и фаз газораспределения [17,18], а также впрыск воды в цилиндр двигателя [18-20]. Так же проблема выбросов в автотранспорте решается переходом на электромобили, однако, переход тракторной техники осложняется небольшим запасом хода и дороговизной электрических компонентов [21,22].

Использование воды в качестве водотопливной эмульсии не нова. Известны исследования по смесевому топливу, когда производится смешивание дизельного топлива с водой и подается в камеру сгорания, также известны эксперименты подачи воды во впускной коллектор двигателя внутреннего сгорания [10, 18, 23]. Как отмечается, происходит положительный эффект на основные характеристики двигателя, однако, также имеется и негативный эффект, он заключается в следующем: при использовании смеси с дизельным топливом происходит коррозия прецизионных пар в топливном насосе и форсунках [17,18]. Это вызывает подклинивание трущихся поверхностей, как следствие, возникает повышенный износ и теряется герметичность. Представленная система позволяет убрать эти недостатки при использовании воды, так как вода подается в камеру сгорания в виде перегретого пара и в смеси с отработавшими газами.

Цель исследований – подтвердить экспериментально эффективность работы системы подачи воды в отработавшие газы газодизельного двигателя, заключающиеся в снижении расхода топлива и повышении экологических показателей, в частности оксидов азота.

Материалы и методы

Объектом исследования был выбран двигатель «Минского Моторного завода» (ММЗ) Д-243, адаптированный для работы на сжиженном

углеводородном газе (пропан-бутановая смесь) по газодизельному процессу. Данный двигатель был оснащен системой рециркуляции отработавших газов (ОГ), а также системой впрыска воды в отработавшие газы. Технические характеристики двигателя ММЗ Д-243 представлены в таблице 1.

Таблица 1. Технические характеристики двигателя «ММЗ Д- 243»

Тип	дизельный
Модель двигателя	ММЗ Д-243
Мощность двигателя, кВт (л. С.)	57 (78)
Номинальная частота вращения, об/мин	2200
Число цилиндров, шт.	4
Рабочий объём, см ³	4750
Максимальный крутящий момент, Н*м	258
Коэффициент запаса крутящего момента, %	15
Ёмкость топливного бака, л Дизель/ пропан-бутан	50/90

Схема адаптации системы рециркуляции ОГ, а также системы впрыска воды в отработавшие газы представлена на рисунке 1.

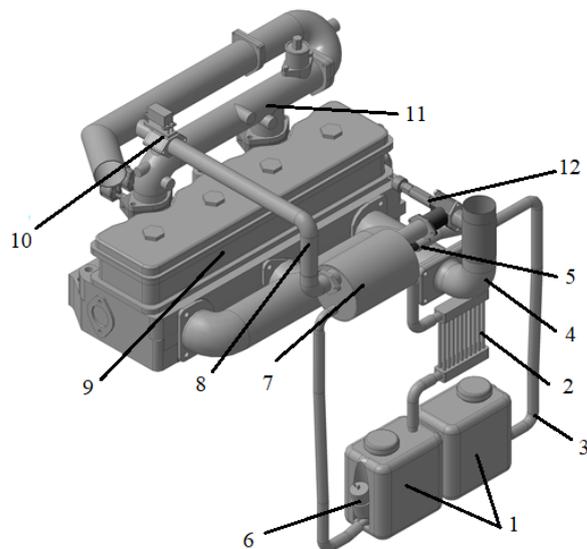


Рис. 1. Система рециркуляции отработавших газов и система впрыска воды

1 – баки для воды; 2 – радиатор охлаждения; 3 – магистраль для воды; 4 – выпускной коллектор; 5 – форсунка подачи воды в камеру охлаждения; 6 – циркуляционный насос; 7 – теплообменник с камерой смесеобразования; 8 – магистраль подачи рециркуляционных ОГ; 9 – головка блока цилиндров; 10 – дроссель регулирования подачи; 11 – впускной коллектор; 12 – клапан подачи отработавшего газа.

Данная система снабжена системой впрыска воды в отработавшие газы газодизельного двигателя. Схема данной системы представлена на рисунке 2.

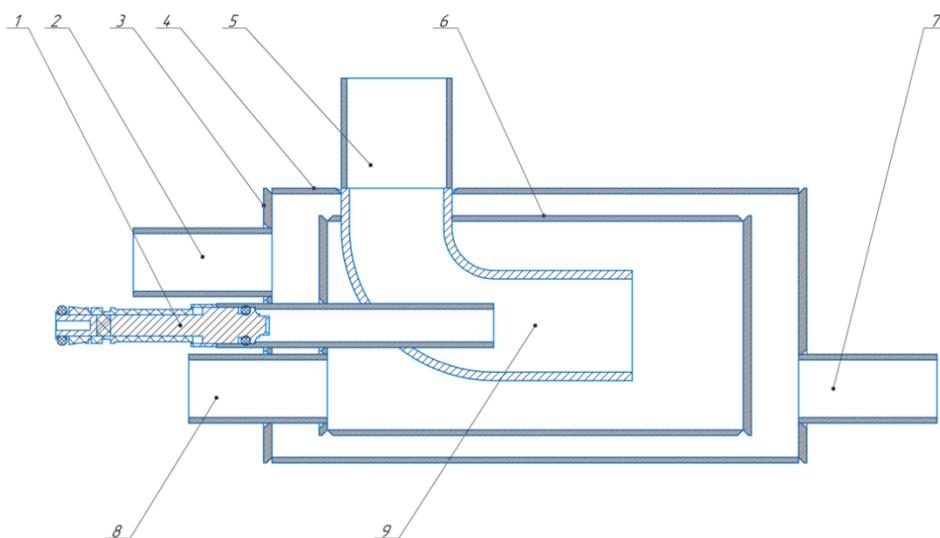


Рис. 2. Схема системы подачи воды в отработавшие газы

1- форсунка подачи воды. 2 - подвод ОЖ. 3 - крышка. 4- камера или рубашка охлаждения. 5 - вход отработавших газов. 6. камера расширения. 7- отвод ОЖ. 8 - выход охлажденных насыщенных паром воды отработавших газов. 9 - камера испарения

Для наглядности ниже представлены рисунок 3а внешнего вида системы впрыска воды в ОГ, а также на рисунке 3б представлен разрез данной системы

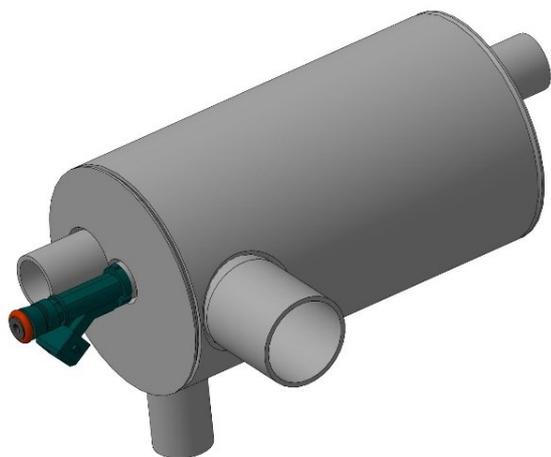


Рис. 3а. Внешний вид устройства подачи воды

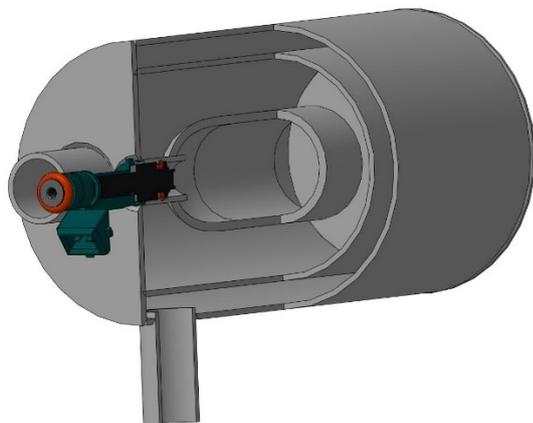


Рис. 3б. Внешний вид устройства подачи воды в разрезе

При выполнении работ трактором МТЗ-82 с двигателем Д-243 максимальное значение

оборотов двигателя составляет 2200 при эксплуатационной мощности. Двигатель четырехцилиндровый с рабочим объемом 4750 см³, имеет эффективность наполнения цилиндра – E принятое за 85 % (в современных двигателях E при оборотах близких к максимальному крутящему моменту 85-95%, на максимальных оборотах 75...85 %, поэтому для расчетов принимаем 85%) для ДВС без турбонадува.

Из этого следует, что объем потребления воздуха четырехтактным двигателем трактора МТЗ 82 в минуту рассчитывается по формуле:

$$N_{\text{в}} = V * n * E / 2 = 4,75 * 2200 * 0,85 / 2 = 4441,3 \text{ л/мин.} \quad (1)$$

где V – объем двигателя, n – число оборотов двигателя в минуту, E - эффективность наполнения цилиндра воздухом. 2 – делитель (коэффициент для четырехтактных двигателей, у которых полный цикл совершается за 2 оборота коленчатого вала).

Масса воздуха рассчитывается по формуле:

$$m = V / \rho; \quad (2)$$

$$m_{\text{м}} = 4441,3 / 830 = 5,35 \text{ кг/мин}$$

соответственно за 1 час расход воздуха составит

$$m_{\text{ч}} = 5,35 * 60 = 321 \text{ кг/ч}$$

где ρ – плотность воздуха (объем 1 кг воздуха при температуре 20 °С составляет 830 л).

При работе в газодизельном режиме при соотношении 18 % ДТ и 82 % СУГ отношение воздух / топливо (стехиометрия) $C_{\text{ст}}$ примем 15/1. Так как у дизельного топлива соотношение равно 14,7, а у смеси пропан-бутан, в зависимости от пропорции, примем 15,2.

Удельный расход топлива при максимальной мощности $N_{\text{max}} = 57 \text{ кВт}$, составил $G_{\text{е}} = 293 \text{ г/кВт*ч}$.

Соответственно, для сжигания топлива при максимальной мощности необходимое количество воздуха $m_{\text{вф}}$ вычисляется по формуле:

$$m_{\text{вф}} = G_e \cdot N_{\text{max}} \cdot C_{\text{ст}} = 16,7 \cdot 57 \cdot 15 = 250,5 \text{ кг/ч} \quad (3)$$

Как видно из расчетов, для сгорания максимального количества топлива необходимо 250,5 кг/ч воздуха, при этом двигатель потребляет 321 кг/ч, что на 28% (70,5 кг) больше необходимого количества. Таким образом, объем рециркуляционного отработавшего газа с водяными парами составит максимум 70,5 кг/ч. При том, что давление отработавших газов будет составлять 1,1 атмосферы.

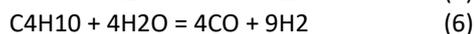
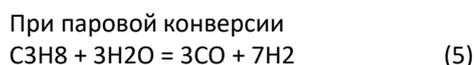
Стандартный размер всасывающей трубы воздушного фильтра составляет 70 мм, что является 72 % всасываемого необходимого воздуха. Соответственно, для рециркуляционной трубы нужен диаметр 29 мм. Учитывая то, что рециркуляционные газы подаются с давлением в 1,1 раза превышающее всасываемый воздух, получим, что диаметр трубы составит:

$$D_p = 29 / 1,1 = 26 \text{ мм} \quad (4)$$

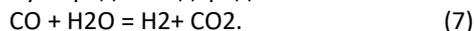
Ближайшая стандартная труба имеет диаметр 25 мм, соответственно, был выбран этот диаметр трубы.

При работе двигателя, в зависимости от его режимов, система рециркуляции ОГ и подачи воды соответственно работают по-разному. Это обеспечивается блоком управления открытия заслонок системы рециркуляции ОГ и впрыска воды.

Система подачи воды работает на режимах более 30 % максимальной мощности двигателя. Подача воды осуществляется форсункой в зону перепуска горячих отработавших газов (более 300°C) в рабочей зоне теплообменника. При использовании рециркуляции отработавших газов с впрыском воды в струю рециркулирующих отработавших газов и подачей СУГ во впускной коллектор происходит комбинированная углекислотная и паровая конверсия газовой смеси в камере сгорания.



Параллельно происходит паровая конверсия окиси углерода в водород



Водород и окись углерода имеют очень широкие концентрационные пределы воспламенения по объему в воздухе соответственно от 4,09% до 77 % и от 12,5 % до 80 %, которые значительно шире чем у пропана (1,7 % до 10,9 %). Водород имеет более высокий коэффициент диффузии 0,66 м²/с в отличие от пропана 0,196 м²/с. Для воспламенения водорода необходимо меньше энергии приблизительно в 17 раз. Минимальная энергия воспламенения водорода 0,017 мДж, а у пропана 0,26 мДж.

При парообразовании обеспечивается частичное охлаждение отработавших газов с последующим охлаждением парогазовой смеси в теплообменнике до требуемых температур (менее 90°C) и ее подачи во впускной коллектор, и далее паровоздушная смесь попадает в цилиндр.

При проведении испытаний системы впрыска воды в газодизельном двигателе учитывалась теплотворная способность двух видов топлива. Теплотворная способность дизельного топлива составляет 42,7 МДж/кг, у пропан-бутановой смеси 46,8 МДж/кг. В одном литре дизельного топлива 0,86 кг, а у пропан-бутановой смеси 0,56 кг. При соотношении теплотворной способности для замещения 1 кг ДТ необходимо 0,91 кг СУГ.

Результаты испытаний при работе на дизельном топливе, газодизельном режиме и на газодизельном режиме со впрыском воды представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты испытаний газодизельного двигателя с системой подачи воды в ОГ (ДТ – дизельное топливо, ГД – газодизельный режим, ГД+В – газодизельный режим + впрыск воды).

Тип топлива	Мощность, %	СО, %	НС, ppm	NO _x , ppm	СО ₂ , %	Температура отработавших газов, °С	Дымность, К 1/м
ДТ	25	0,03	16	47	2,9	320	1,16
	50	0,03	24	181	3,2	440	1,21
	75	0,05	27	275	3,4	470	1,26
	100	0,12	41	492	6,1	660	5,28
ГД	25	0,02	19	153	2,1	400	0,36
	50	0,02	27	271	2,8	470	0,59
	75	0,06	30	340	3,3	530	0,78
	100	0,17	49	610	9,6	710	1,71
ГД+В	25	0,02	18	43	4,5	310	0,17
	50	0,02	26	160	6,1	410	0,51
	75	0,05	29	232	9,3	450	0,66
	100	0,09	44	421	11,2	620	1,66

При использовании системы подачи воды в отработавшие газы в газодизельном режиме происходит снижение выбросов оксидов азота относительно использования газодизельного топлива без впрыска воды. Также происходит снижение дымности и незначительное снижение СО, СО₂ и НС. Относительно показателей при использовании

дизельного топлива снижение выбросов более существенно.

Обсуждение

Использование системы впрыска воды в отработавшие газы газодизельного двигателя положительно влияет на эффективность сгорания и значительно снижает образование NO_x. При попадании

пара в камеру сгорания капли воды хорошо смешиваются и быстро испаряются, поглощая тепло заряда цилиндра из-за его высокой теплоемкости, а парциальное давление кислорода увеличивается. В заключение следует отметить, что пиковая температура сгорания и, следовательно, выбросы NOx снижаются [24]. Впрыск воды приводит к снижению выбросов NOx по сравнению с режимами без впрыска воды на всех оборотах двигателя, поскольку снижаются пиковые температуры сгорания. Максимальное значение NOx составляет 610 ppm в двигателе с работающей смесью СУГ и дизельного топлива при 2200 об/мин. Минимальное значение NOx при максимальной мощности составляет 421 ppm при 2200 об/мин с впрыском пара, таким образом снижение оксидов азота происходит на 32%. В приведенных исследованиях других авторов также отмечается снижение выбросов оксидов азота при использовании впрыска воды в камеру сгорания.

Литература

1. Уютов С. Ю., Овчинников Е. В., Чаплыгин М. Е. Оценка эффективности систем адаптации газодизельного двигателя для работы в закрытых помещениях // Экология промышленного производства. 2022. № 1(117). С. 42-49. doi:10.52190/2073-2589_2022_1_42. EDN BZWPUX.
2. Овчинников Е. В., Овчаренко А. С. Проблемы и пути снижения выбросов углекислого газа от транспорта, промышленного производства и коммунального хозяйства // Экология промышленного производства. 2021. № 4(116). С. 28-32. doi:10.52190/2073-2589_2021_4_28. EDN VMUUDT.
3. Система адаптации дизельного двигателя для работы в помещениях с ограниченным воздухообменом / Е. В. Овчинников, А. Ю. Измайлов, С. Ю. Уютов и др. // Экология промышленного производства. 2021. № 1(113). С. 46-50. doi:10.52190/2073-2589_2021_1_46. EDN NYTZKI.
4. New method to reduce NOx emissions of diesel engines: electronically controlled steam injection system / A. Parlak, V. Ayhan, Y. Üst, et al. // Journal of the Energy Institute. 2012. Vol. 85. No. 3. P. 135-139.
5. Investigation of the effects of steam injection on performance and emissions of a diesel engine fuelled with tobacco seed oil methyl ester / A. Parlak, V. Ayhan, İ. Cesur, et al. // Fuel Processing Technology. 2013. Vol. 116. P. 101-109. doi:10.1016/j.fuproc.2013.05.006
6. Effects of diluent admissions and intake air temperature in exhaust gas recirculation on the emissions of an indirect injection dual fuel engine / G. H. Abd-Alla, H. A. Soliman, O. A. Badr, et al. // Energy Conversion and Management. 2001. Vol. 42. No. 8. P. 1033-1045.
7. Ways to reduce negative impacts from the use of rapeseed oil as a fuel for diesel engines / Ovchinnikov E., Uytov S., Fedotkin R., et al. // Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. Vol. 463 LNNS. P. 290-301. doi:10.1007/978-3-031-03877-8_26. EDN DBNXIU.
8. Yilmaz N., Morton B. Comparative characteristics of compression ignited engines operating on biodiesel produced from waste vegetable oil // Biomass Bioenergy. 2011. Vol. 35(5). P. 2194-2199
9. Mohamed Y.E Selim. Effect of exhaust gas recirculation on some combustion characteristics of dual fuel engine // Energy Conversion and Management. Vol. 44. No. 5. 2003. P. 707-721. doi:10.1016/S0196-8904(02)00083-3.
10. Сторожев И. И., Трошков И. А. Определение пропорций водо-метаноловой смеси при подаче в систему питания воздухом двигателя Д-240 // Известия ОГАУ. 2019. №2 (76). С. 140-143.
11. Effect of retarded injection timing and EGR on performance, combustion and emission characteristics of a CRDi diesel engine fueled with WHDPE oil/diesel blends / D. Kulandaivel, I.G. Rahamathullah, A.P. Sathiyagnanam, K. et al. // Fuel. Vol. 278. 2020. P. 118304. doi:10.1016/j.fuel.2020.118304.
12. Roy S., Hegde M. S., Madras G.. Catalysis for NOx abatement // Applied Energy. 2009.. Vol. 86. No. 11. P. 2283-2297. doi:10.1016/j.apenergy.2009.03.022.
13. Experimental investigation of combined lnt + scr diesel exhaust aftertreatment. emiss / T. Wittka, B. Holderbaum, P. Dittmann, et al. // Control Sci. Technol. 2015. No. 1. P. 167-182. doi:10.1007/s40825-015-0012-0>
14. Venu H., Subramani L., Raju V. D. Emission reduction in a DI diesel engine using exhaust gas recirculation (EGR) of palm biodiesel blended with TiO2 nano additives // Renewable Energy. 2019. Vol. 140. P. 245-263. doi:10.1016/j.renene.2019.03.078

Также установлено снижение дымности в отработавших газах и незначительное уменьшение других вредных выбросов [14, 25]. Стоит отметить снижение вибрации и шума при использовании системы подачи воды в отработавшие газы. Вибрацию измеряли осциллографом фирмы Owon model: PDS5022S и она составила 37,161 kHz, при использовании воды 2,651 kHz соответственно

Заключение

Система подачи воды в отработавшие газы газодизельного двигателя экспериментально подтвердила снижение количества запальной дозы на 7% в газодизельном двигателе до наступления детонационного горения, тем самым улучшились экологические показатели в среднем на 17%. Также стоит отметить, что при использовании данной системы происходит снижение вибрации и шума работы двигателя на 34,5 kHz, тем самым говоря о более сбалансированной работе двигателя.

15. Emissions characteristics and engine performance from the interaction effect of egr and diesel-ethanol blends in diesel engine / M. A. Fayad, M. K. Al-Ghezi, S. A. Hafad, et al. // *International Journal of Renewable Energy Development*. 2022. Vol. 11(4). P. 991-1001. doi:10.14710/ijred.2022.45051
16. Zheng M., Reader G. T., Hawley J. G. Diesel engine exhaust gas recirculation—a review on advanced and novel concepts // *Energy Conversion and Management*. 2004. Vol. 45. No. 6. P. 883-900. doi:10.1016/S0196-8904(03)00194-8
17. Comparison of steam injected diesel engine and Miller cycled diesel engine by using two zone combustion model / G. Gonca, B. Sahin, Y. Ust, et al. // *Journal of the Energy Institute*. 2015. Vol. 88. No. 1. С. 43-52.
18. Сторожев И. И., Старцев А. В., Романов С. В. Определение параметров работы двигателя Д-240 с добавлением водо-метаноловой смеси в систему питания воздухом // *Норвежский журнал развития международной науки*. 2019. №. 35-1. С. 35-43.
19. Теоретические исследования влияния впрыска воды на показатели работы дизельного двигателя / Л. В. Денежко, Л. А. Новопашин, А. А. Садов и др. // *Научно-технический вестник: Технические системы в АПК*. 2019. № 3(3). С. 99-104. EDN TGLCMU.
20. Реологические свойства водотопливных эмульсий, приготовляемых методом впрыска воды в дизельное топливо / Л. С. Керученко, Е. И. Мальцева, С. П. Прокопов и др. // *Вестник ОмГАУ*. 2022. №1 (45). С. 129-138.
21. Гусаров В. А. Силовая установка для мобильного транспортного средства класса 0,6 0,8 на базе тракторного самоходного шасси Т 16 // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. № 2. С. 26-32. doi: 10.22314/2073-7599-2021-15-2-26-32. EDN OHETEW
22. Бижаев А. В. Исследование параметров трактора с электроприводным силовым агрегатом // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. № 4. С. 33-42. doi 10.22314/2073-7599-2020-14-4-33-42. EDN PHRDPD
24. Bedford, F. Rutland, C., Dittrich, P., et al. Effects of direct water injection on DI diesel engine combustion // *SAE Technical Paper*. 2000. No. 2000-01-2938. P. 2938-2950
25. Ayhan V., Ece Y. M. New application to reduce NOx emissions of diesel engines: Electronically controlled direct water injection at compression stroke // *Applied Energy*. 2020. Vol. 260. P. 114328. doi:10.1016/j.apenergy.2019.114328

References

1. Uyutov S. Yu., Ovchinnikov E. V., Chaplygin M. E. Evaluation of the effectiveness of gas-diesel engine adaptation systems for operation in enclosed spaces // *Ecology of industrial production*. 2022. No. 1 (117). P. 42-49. doi: 10.52190/2073-2589_2022_1_42. EDN BZWPUX.
2. Ovchinnikov E. V., Ovcharenko A. S. Problems and ways to reduce carbon dioxide emissions from transport, industrial production and utilities // *Ecology of industrial production*. 2021. No. 4 (116). P. 28-32. doi: 10.52190 / 2073-2589_2021_4_28. EDN VMUUDT.
3. Diesel engine adaptation system for operation in rooms with limited air exchange / E. V. Ovchinnikov, A. Yu. Izmailov, S. Yu. Uyutov et al. // *Ecology of industrial production*. 2021. No. 1 (113). P. 46-50. doi: 10.52190 / 2073-2589_2021_1_46. EDN NYTZKI.
4. New method to reduce NOx emissions of diesel engines: electronically controlled steam injection system / A. Parlak, V. Ayhan, Y. Üst, et al. // *Journal of the Energy Institute*. 2012. Vol. 85.No. 3. P. 135-139.
5. Investigation of the effects of steam injection on performance and emissions of a diesel engine fuelled with tobacco seed oil methyl ester / A. Parlak, V. Ayhan, İ. Cesur, et al. // *Fuel Processing Technology*. 2013. Vol. 116. P. 101-109. doi:10.1016/j.fuproc.2013.05.006
6. Effects of diluent admissions and intake air temperature in exhaust gas recirculation on the emissions of an indirect injection dual fuel engine / G. H. Abd-Alla, H. A. Soliman, O. A. Badr, et al. // *Energy Conversion and Management*. 2001. Vol. 42.No. 8. P. 1033-1045.
7. Ways to reduce negative impacts from the use of rapeseed oil as a fuel for diesel engines / Ovchinnikov E., Uyutov S., Fedotkin R., et al. // *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. Vol. 463 LNNS. P. 290-301. doi:10.1007/978-3-031-03877-8_26. EDN DBNXIU.
8. Yilmaz N., Morton B. Comparative characteristics of compression ignited engines operating on biodiesel produced from waste vegetable oil // *Biomass Bioenergy*. 2011. Vol. 35(5). P. 2194–2199
9. Mohamed Y.E Selim. Effect of exhaust gas recirculation on some combustion characteristics of dual fuel engine // *Energy Conversion and Management*. Vol. 44.No. 5. 2003. P. 707-721. doi:10.1016/S0196-8904(02)00083-3.
10. Storozhev I. I., Troshkov I. A. Specification of the proportions of the water-methanol mixture when supplied into the air supply system of the D-240 engine / // *News of OSAU*. 2019. No. 2 (76). P. 140-143.
11. Effect of retarded injection timing and EGR on performance, combustion and emission characteristics of a CRDi diesel engine fueled with WHDPE oil/diesel blends / D. Kulandaivel, I.G. Rahamathullah, A.P. Sathiyagnanam, K. et al. // *Fuel*. Vol. 278. 2020. P. 118304. doi:10.1016/j.fuel.2020.118304.
12. Roy S., Hegde M. S., Madras G.. Catalysis for NOx abatement // *Applied Energy*. 2009.. Vol. 86.No. 11. P. 2283-2297. doi:10.1016/j.apenergy.2009.03.022.

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)

13. Experimental investigation of combined Int + scr diesel exhaust aftertreatment. emiss / T. Wittka, B. Holderbaum, P. Dittmann, et al. // *Control Sci. Technol.* 2015. No. 1. R. 167-182. doi:10.1007/s40825-015-0012-0>
14. Venu H., Subramani L., Raju V. D. Emission reduction in a DI diesel engine using exhaust gas recirculation (EGR) of palm biodiesel blended with TiO₂ nano additives // *Renewable Energy.* 2019. Vol. 140. P. 245-263. doi:10.1016/j.renene.2019.03.078
15. Emissions characteristics and engine performance from the interaction effect of egr and diesel-ethanol blends in diesel engine / M. A. Fayad, M. K. Al-Ghezi, S. A. Hafad, et al. // *International Journal of Renewable Energy Development.* 2022. Vol. 11(4). P. 991-1001. doi:10.14710/ijred.2022.45051
16. Zheng M., Reader G. T., Hawley J. G. Diesel engine exhaust gas recirculation—a review on advanced and novel concepts // *Energy Conversion and Management.* 2004. Vol. 45.No. 6. P. 883-900. doi:10.1016/S0196-8904(03)00194-8
17. Comparison of steam injected diesel engine and Miller cycled diesel engine using two zone combustion model / G. Gonca, B. Sahin, Y. Ust, et al. // *Journal of the Energy Institute.* 2015. Vol. 88. No. 1. P. 43-52.
18. Storozhev I. I., Startsev A. V., Romanov S. V. Specification of operating parameters of the D-240 engine with the addition of a water-methanol mixture to the air supply system // *Norwegian Journal of International Science Development.* 2019. No. 35-1. P. 35-43.
19. Theoretical studies of the effect of water injection on performance of a diesel engine / L. V. Denezhko, L. A. Novopashin, A. A. Sadov et al. // *Scientific and technical Vestnik: Technical systems in the agro-industrial complex.* 2019. No. 3 (3). P. 99-104. EDN TGLCMU.
20. Rheological properties of water-fuel emulsions prepared by injecting water into diesel fuel / L. S. Keruchenko, E. I. Maltseva, S. P. Prokopov et al. // *Vestnik of Omsk State Agrarian University.* 2022. No. 1 (45). P. 129-138.
21. Gusarov V. A. Power plant for a mobile vehicle of class 0.60.8 based on T16 self-propelled tractor chassis // *Agricultural machinery and technologies.* 2021. Vol. 15. No. 2. P. 26-32. doi: 10.22314/2073-7599-2021-15-2-26-32. EDN OHETEW
- 22 Bizhaev A. V. Study of parameters of a tractor with an electric power unit // *Agricultural Machinery and Technologies.* 2020. Vol. 14. No. 4. P. 33-42. doi 10.22314/2073-7599-2020-14-4-33-42. EDN PHRDPD
24. Bedford, F. Rutland, C., Dittrich, P., et al. Effects of direct water injection on DI diesel engine combustion // *SAE Technical Paper.* 2000. No. 2000-01-2938. P. 2938-2950
25. Ayhan V., Ece Y. M. New application to reduce NO_x emissions of diesel engines: Electronically controlled direct water injection at compression stroke // *Applied Energy.* 2020. Vol. 260. P. 114328. doi:10.1016/j.apenergy.2019.114328