

УДК 631.86: 633.16: 631.453

ВЛИЯНИЕ МЕТИЛОВЫХ ЭФИРОВ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ НА ВЫБРОСЫ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Чертков Г.Я., аспирант

E-mail: since.7173@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Вятский государственный агротехнологический университет»,
г. Киров, Россия

Аннотация. Рассмотрено влияние биодизеля на основе метиловых эфиров растительных масел на процесс сгорания в дизельном двигателе, приводящий к снижению выбросов массы твердых частиц (PM, ТЧ), несгоревших частиц углеводородов и оксида углерода по сравнению с дизельным топливом, а также увеличению оксидов азота. Сырье и состав биодизеля могут быть оптимизированы в ходе производственного процесса для улучшения условия по использованию биодизеля в дизельных двигателях.

Ключевые слова: дизель, метиловый эфир рапсового масла, метиловый эфир пальмового масла, метиловый эфир соевого масла, выбросы твердых частицы сажи.

THE EFFECT OF VEGETABLE OILS METHYL ETHERS ON THE DIESEL ENGINE PARTICULATE EMISSIONS

Chertkov G.Ya., postgraduate student

E-mail: since.7173@mail.ru

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Vyatka State Agrotechnological University», Kirov, Russia

Annotation. The article considers the influence of biodiesel based on vegetable oils methyl ethers on the combustion process in a diesel engine, which leads to a decrease in the mass of solid particles emissions, unburned particles of hydrocarbons and carbon monoxide compared with the diesel fuel, as well as to an increase in nitrogen oxides. The raw materials and composition of biodiesel can be optimized during the production process to improve the conditions for using biodiesel in diesel engines.

Keywords: diesel, rapeseed oil methyl ether, palm oil methyl ether, soybean oil methyl ether, soot particulate emissions.

Использование биодизеля в качестве топлива в дизельных двигателях является потенциально эффективным и экологически чистым решением,



позволяющим снизить чрезмерную зависимость от импорта энергии [1]. Типичное биодизельное топливо представляет собой альтернативное дизельное топливо, состоящее из алкилмоноэфиров жирных кислот, полученных из растительного масла, животных жиров или отходов кулинарного масла посредством реакции переэтерификации. Благодаря сходству физических свойств с дизельным топливом чистое биодизельное топливо или его смеси с дизельным топливом (ДТ) можно использовать непосредственно в дизельных двигателях. Некоторые исследования доказывают, что сгорание биодизеля в дизельном двигателе имеет тенденцию приводить к снижению выбросов массы твердых частиц (PM), несгоревших частиц углеводородов и оксида углерода по сравнению с ДТ, а также увеличение оксидов азота [2].

Существует множество причин снижения выбросов дыма и массы твердых частиц. Во-первых, содержание кислорода в биодизеле может обеспечить более полное сгорание даже в зонах камеры сгорания с богатым диффузионным сгоранием и улучшить окисление уже образовавшейся сажи [3]. Во-вторых, отсутствие ароматических соединений в биодизельном топливе является еще одним важным фактором снижения выбросов твердых частиц [4]. В-третьих, из-за высокого цетанового числа опережение сгорания, получаемое за счет использования биодизельного топлива, продлевает время пребывания частиц сажи в высокотемпературной атмосфере, что приводит к дальнейшему окислению частиц сажи [2]. Более того, внутренняя структура первичных частиц имеет тенденцию создавать полости, вероятно, вызванные кислородными связями биодизеля, что может способствовать более быстрому окислению сажи [5].

Типичными компонентами биодизеля являются насыщенные и ненасыщенные метиловые или этиловые эфиры с 12-20 атомами углерода в углеродной цепи, которая зависит от сырья. В работе S. Puhan, G. Nagarajan [6] было проведено несколько исследований влияния молекулярной структуры на



характеристики сгорания и выбросы. Они исследовали влияние ненасыщенных жирных кислот биодизеля на выбросы одноцилиндрового дизельного двигателя с непосредственным впрыском и обнаружили, что менее насыщенное биодизельное топливо выделяет более высокие выбросы HC , CO и дыма. М. Salamanca et al. [7] исследовали изменения в химическом составе и морфологии сажи, вызванные степенью ненасыщенности биодизеля и биодизельной смеси. Они обнаружили, что с увеличением степени ненасыщенности биодизельного топлива увеличивается дымность отработавших газов, количество твердых частиц, содержание летучих веществ в твердых частицах и содержание алифатических соединений в твердых частицах. Однако М. Lapuerta et al. [8] обнаружили неблагоприятный результат: по мере того, как биодизельное топливо становилось более ненасыщенным, выбросы массы частиц уменьшались на 20% из-за меньшего образования ароматических соединений и более высокой адиабатической температуры пламени в случае ненасыщенных сложных эфиров. А. Schönborn et al. [9] исследовали влияние молекулярной структуры метилового эфира на сгорание в одноцилиндровом двигателе. Они пришли к выводу, что количество двойных связей в молекулах жирных кислот сильно коррелирует с эмиссией частиц сажи в режиме накопления, тогда как числовая концентрация частиц в режиме нуклеации хорошо коррелирует с температурой кипения молекул топлива. Однако сегодня нет единого мнения о том, влияет ли состав биодизеля на основе метилового эфира на дымность отработавших газов (ОГ) и выбросы твердых частиц. Есть и другие работы, в которых не обнаружили влияния биодизельного сырья на дымность ОГ и выбросы твердых частиц [10].

В исследовании использовались четырехцилиндровые дизельные двигатели в сочетании с вихретоковым динамометром [11]. Испытания проводились при постоянной частоте вращения двигателя 1500 мин^{-1} и 2500 мин^{-1} и нагрузках двигателя 0 Нм, 75 Нм, 150 Нм, 225 Нм и 300 Нм, что



соответствует среднему эффективному давлению 0 МПа, 0,24 МПа, 0,48 МПа, 0,72 МПа и 0,96 МПа соответственно. Чтобы обеспечить повторяемость и сопоставимость измерений для разных режимов работы, температура автоматически контролировалась системой охлаждения, сохранялась на уровне 85°C и удерживалась в пределах $\pm 2^\circ\text{C}$, при этом температура масла поддерживалась на уровне 90-95°C. Температура на впуске на уровне 26°C в пределах $\pm 2^\circ\text{C}$ также контролировалась системой промежуточного охлаждения.

Были исследованы дизельное и три вида биодизельного топлива, произведённые из рапсового, пальмового и соевого масел путем переэтерификации метанолом, далее RME (метилвый эфир рапсового масла), PME (метилвый эфир пальмового масла) и SME (метилвый эфир соевого масла).

Были приготовлены три смеси топлива в объёмной пропорции 50%, при этом базовое дизельное топливо было обозначено как RME50, PME50 и SME50.

Таблица 1 – Свойства исследуемых топлив

Свойство	ДТ	RME (МЭРМ)	PME (МЭПМ)	SME (МЭСМ)
Цетановое число	51	53	62	52
Вязкость, Мпа/с	2,97	4,4	4,5	4,2
Точка кипения, °C	180~330	300~350	300~350	300~350
Содержание углерода, %	87,4	76,8	76,6	77,1
Содержание кислорода, %	0	10,9	11,2	10,97
Содержание серы, %	400	<10	<10	<10

Свойства топлив показаны в таблице 1. Непрозрачность дыма, состав твердых частиц, распределение твердых частиц по размерам и режим зародышеобразования изучались при работе на топливах Diesel, ULSD



(дизельное топливо со сверхнизким содержанием серы), RME50, PME50 и SME50 на двух постоянных режимах работы двигателя. Проведено сравнение выбросов твердых частиц различных биодизелей и с точки зрения их сложноэфирного состава.

Стандартные ошибки эксперимента составляли 1,3% для массового расхода топлива, 1,9% для дымности ОГ, 2,5% для общей числовой концентрации и 1,7% для SOF (составляющая твердых частиц).

На рисунке 1 представлена дымность ОГ у различных видов топлива при 1500 мин^{-1} .

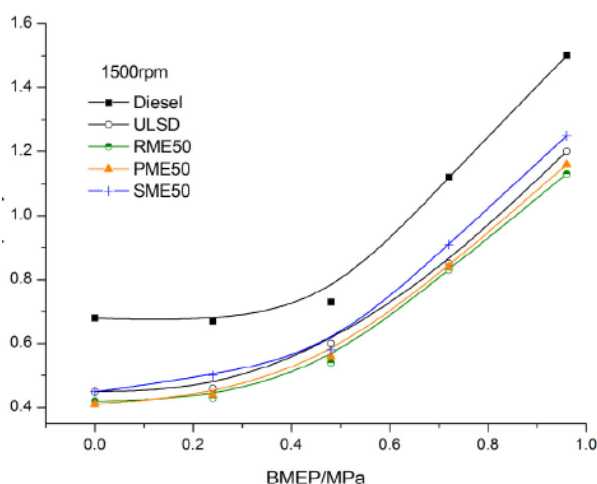


Рисунок 1 – Дымность различных видов топлива при 1500 мин^{-1}

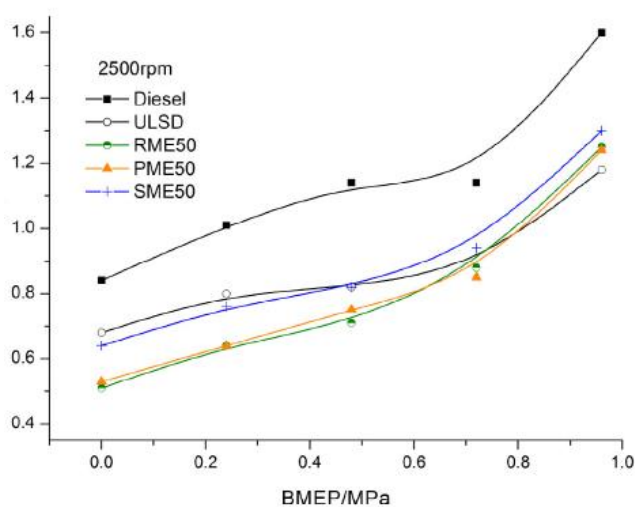


Рисунок 2 – Дымность различных видов топлива при 2500 мин^{-1}



На рисунке 2 представлена дымность ОГ у различных видов топлива при 2500 мин^{-1} . Согласно графикам на рисунках использование в качестве топлива RME50, PME50 и SME50 в большинстве случаев дает меньшую дымность ОГ, чем при работе на дизельном топливе, из-за наличия связанного кислорода и отсутствия ароматических примесей в биодизеле [1111, 12]. При высокой нагрузке непрозрачность дыма у SME50 выше, чем у дизельного топлива. SME50 обеспечивает более высокую непрозрачность дыма, чем RME50 и PME50, во всех режимах тестирования.

На рисунке 3 показано, что снижение дымности ОГ линейно зависит от полиненасыщенной фракции топлива на всех режимах испытаний. С увеличением общей фракции полиненасыщенных кислот дымность уменьшается. Это предполагает, что ненасыщенный эфир с двумя или тремя двойными связями оказывает большее влияние на образование дыма, чем его аналог только с одной двойной связью. Это согласуется с результатами, полученными McCormick et al. [13]. Они обнаружили, что метиллинолеат и метиллиноленат имеют гораздо более высокий массовый выброс твердых частиц, чем метилолеат и метилстеарат. Согласно исследованиям двойная связь ненасыщенного эфира привела к более высокому уровню образования предшественников сажи, таких как концентрация ацетилен, пропина и аллена, по сравнению с насыщенным эфиром. Кроме того, выход ацетилен при пиролизе увеличивается с увеличением количества двойных связей углерод=углерод.

Эти результаты можно использовать для объяснения корреляции между непрозрачностью дыма и долей полиненасыщенных кислот.

С другой стороны, различия в механизмах роста сажи могут быть обусловлены наличием предшественников сажи, образующихся в период разложения топлива, с различным составом топлива, что приводит к различию



в наноструктуре сажи [14]. По сравнению с RME и SME, PME имеют более короткую длину углеродной цепи. Метилвый эфир с более короткой длиной углеродной цепи демонстрирует более высокую реакционную способность сажи и более низкий структурный порядок [15]. Эти сажи гораздо легче окисляются во время позднего сгорания или такта выпуска, что приводит к снижению дымности PME.

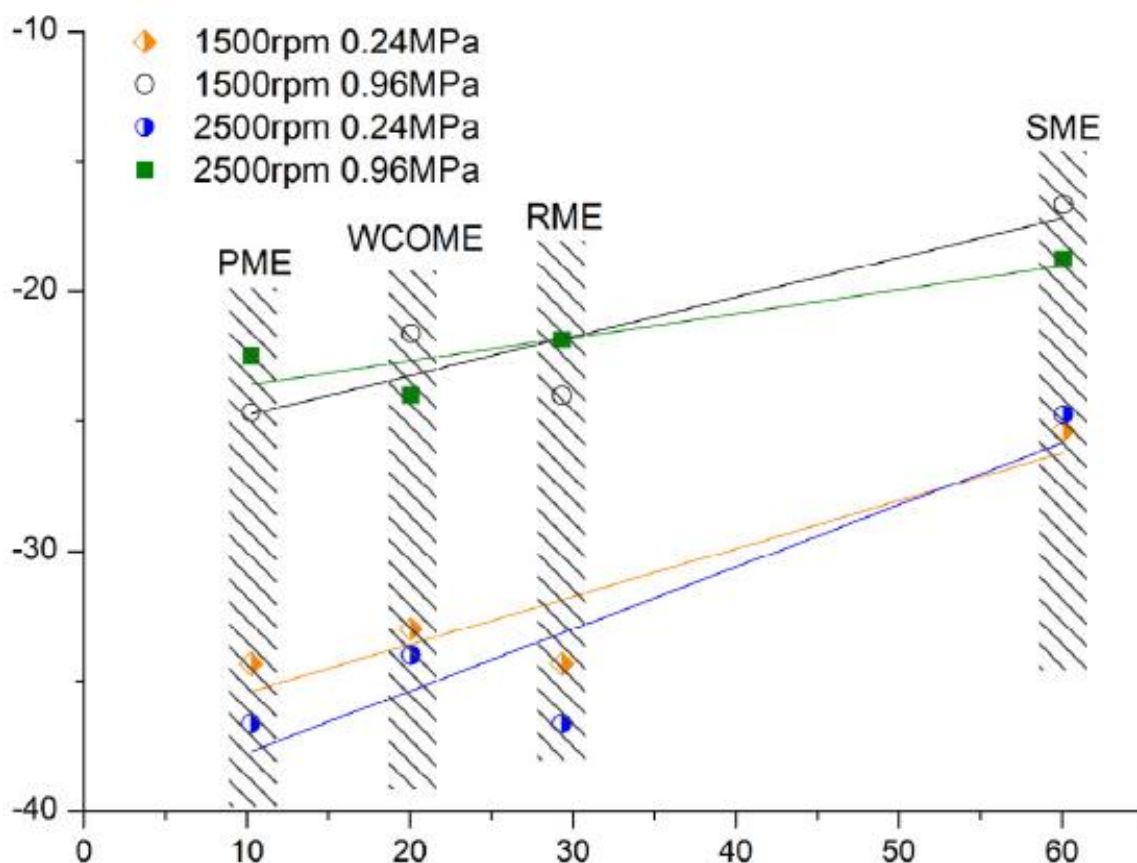


Рисунок 3 – Разница в дымности ОГ по сравнению с общим количеством полиненасыщенных кислот

На рисунке 4 показаны доли SOF, сухой сажи и сульфата для различных видов топлива на установившемся режиме работы дизеля при давлении 0,96 МПа и 2500 мин⁻¹.



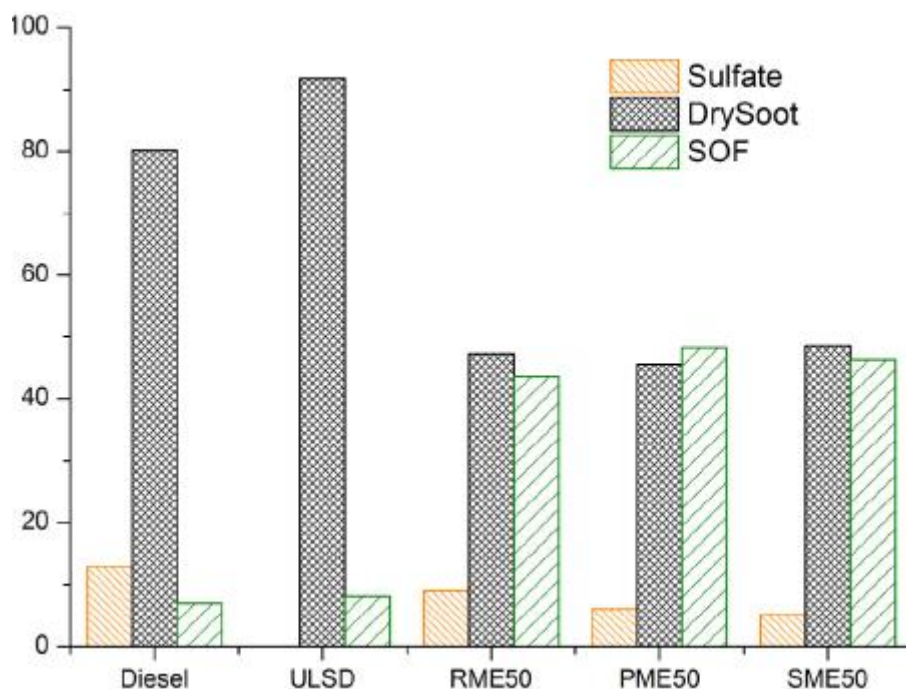


Рисунок 4 – Сажевый состав на различных топливах при 0,96 МПа и 2500 мин⁻¹

Доля сухой сажи снижается при использовании RME50, PME50 и SME50 из-за более высокого содержания кислорода. ULSD имеет самую высокую долю сухой сажи среди видов топлива из-за самого высокого содержания углерода. Доля SOF в RME50, PME50 и SME50 в 5 или 4 раза больше, чем в дизельном топливе и ULSD соответственно. Для ULSD доля SOF находится почти на том же уровне, что и для дизельного топлива, тогда как у PME50 доля SOF значительно выше, чем у RME50 и SME50, статистически, при доверительном уровне 95%. Общая последовательность SOF: PME50 > SME50 > RME50.

Источниками SOF в ТЧ являются частично смазочное масло, несгоревшее масло и соединения, образующиеся при сгорании в камере. Основным отличием происхождения SOF в данном исследовании является несгоревшее масло и соединения при сгорании в камере из-за различного жирноэфирного состава RME, PME и SME. Данные SOF реорганизованы для дальнейшего изучения влияния насыщенной фракции биодизеля на долю SOF в твердых частицах. Увеличение доли SOF (в процентах) по отношению к



значению, полученному с использованием эталонного дизельного топлива, также показано на рисунке 5.

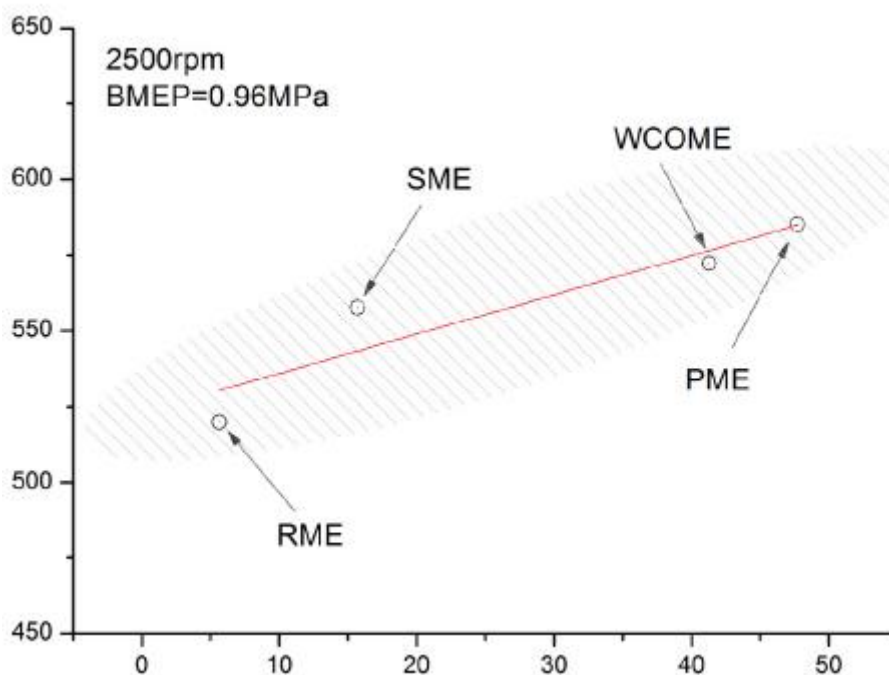


Рисунок 5 – Разница SOF и общего количества насыщенных веществ

Из-за более строгого регулирования выбросов транспортных средств концентрация частиц становится острой проблемой. Распределение частиц по размерам может предоставить важную информацию о вредном воздействии и образовании выбросов твердых частиц. Частица дизельного выхлопа содержит два основных типичных режима: режим нуклеации и режим накопления. Режим нуклеации состоит из частиц с диаметром менее 50 нм частиц дизельных выхлопов. Зародышеобразование серной кислоты и малолетучих органических веществ происходит в процессе разбавления и охлаждения в сочетании с конденсацией полунлетучих органических веществ на поверхности существующих частиц зародышеобразования. Режим накопления состоит из частиц диаметром более 50 нм. Первичная сажа служит ядрами, а различная полунлетучая и нелетучая органика — конденсатами [16].



На рисунках 6 и 7 показаны характеристики гранулометрического состава ТЧ при работе на различных видах топлива для нагрузок двигателя 0,24 МПа и 0,96 МПа при 1500 мин⁻¹ соответственно. Кривые распределения по размерам всех различных видов топлива демонстрируют одну и ту же бимодальную структуру, состоящую из режима нуклеации и режима накопления.

На рисунках 8 и 9 показаны характеристики гранулометрического состава ТЧ при работе на различных видах топлива для нагрузок двигателя 0,24 МПа и 0,96 МПа при 2500 мин⁻¹ соответственно.

Все топлива имеют более высокую числовую концентрацию в режиме нуклеации, чем в режиме накопления. В каждом режиме испытаний смеси биодизеля получают более высокое пиковое значение кривой, чем дизельное топливо, из-за более высокого содержания кислорода, меньшей летучести и худшего распыления биодизеля. Для каждого испытательного топлива общая концентрация частиц зародышеобразования повышается с увеличением нагрузки.

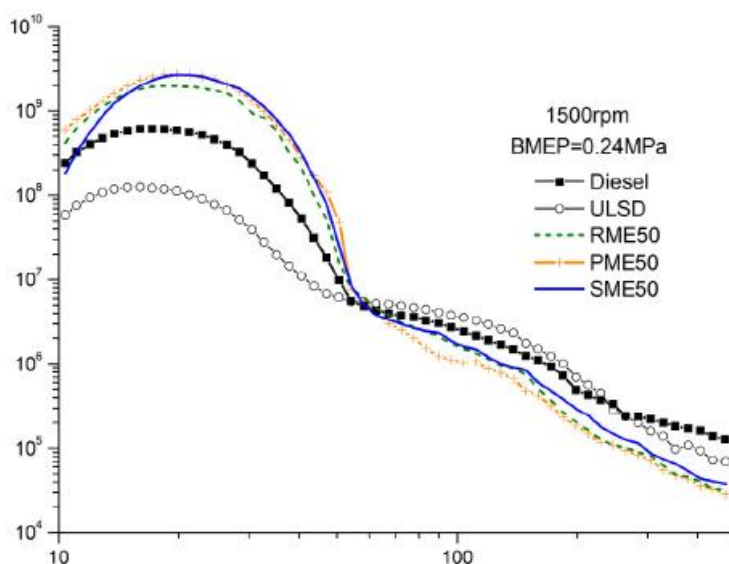


Рисунок 6 – Гранулометрический состав ТЧ при работе на различных топливах при 0,24 МПа и 1500 мин⁻¹



Очевидно, что PME50 имеет более высокую концентрацию частиц зародышеобразования, чем RME50 и SME50.

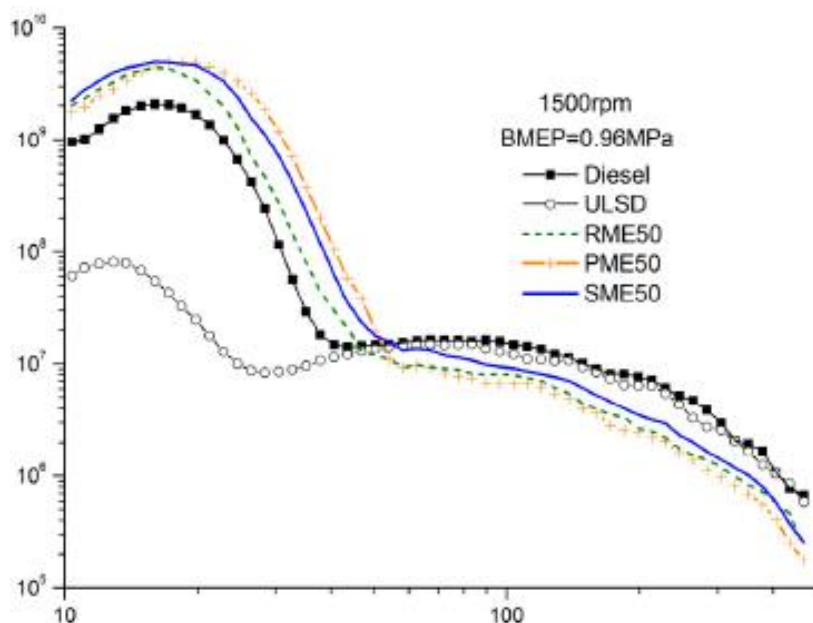


Рисунок 7 – Гранулометрический состав ТЧ при работе на различных топливах при 0,96 МПа и 1500 мин⁻¹

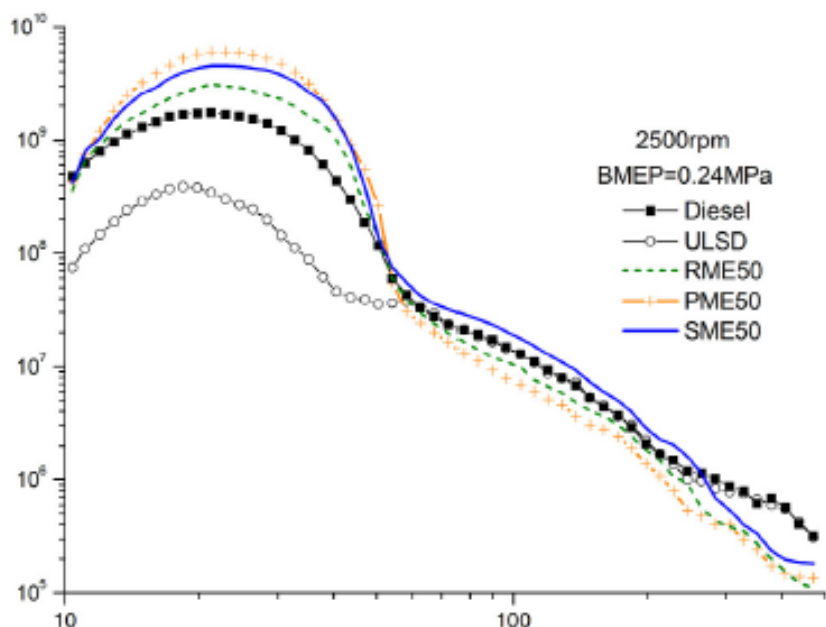


Рисунок 8 – Гранулометрический состав ТЧ при работе на различных топливах при 0,24 МПа и 2500 мин⁻¹



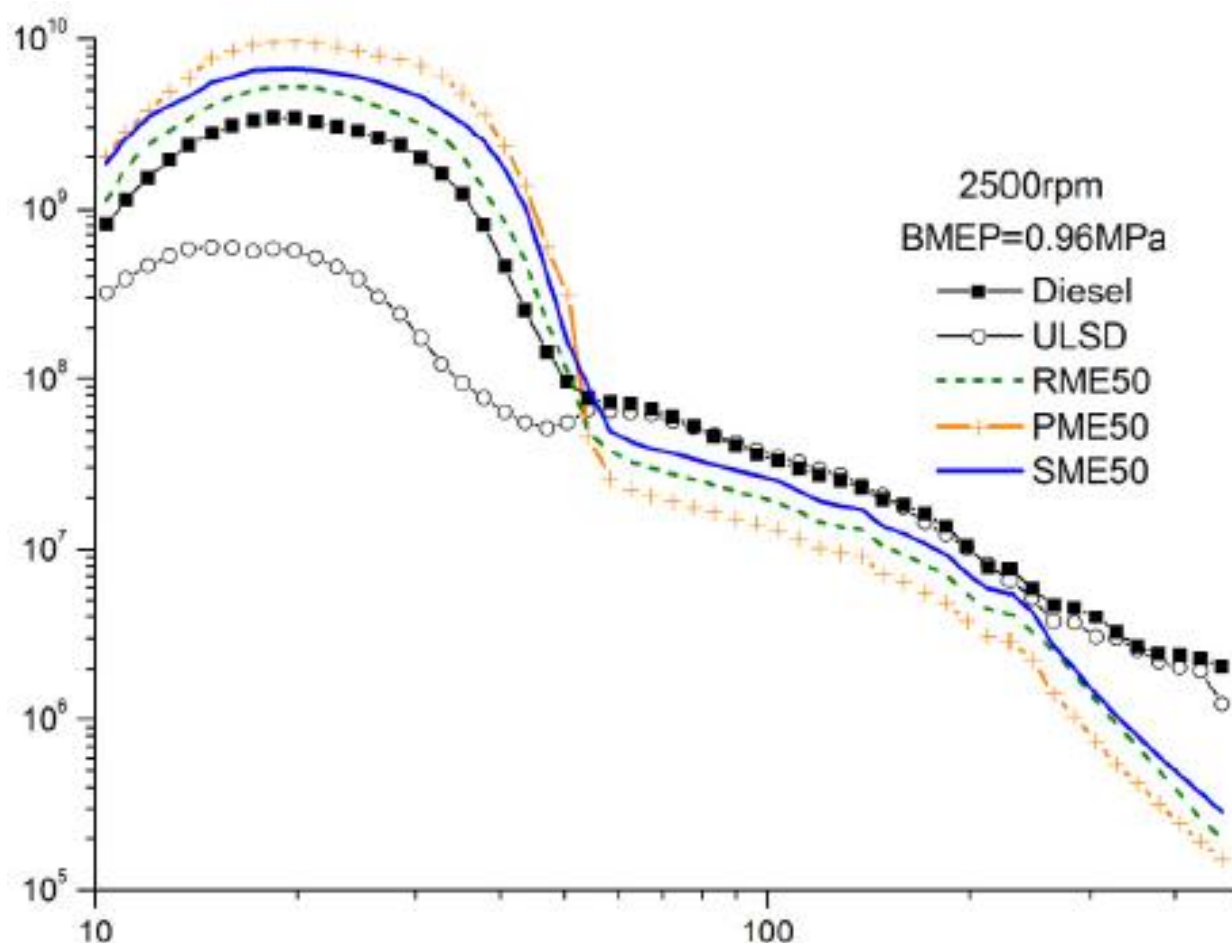


Рисунок 9 – Гранулометрический состав ТЧ при работе на различных топливах при 0,96 МПа и 2500 мин⁻¹

Различия в концентрации числа зародышеобразований статистически значимы на уровне достоверности 95% [17, 18, 19, 20, 21]. Образование частиц режима нуклеации зависит от нуклеации серной кислоты и малолетучей органики [16]. Содержание серы остается одинаковым для RME50, PME50 и SME50. Таким образом, разница в общей концентрации числа зародышей обусловлена главным образом разным составом топлива трех биодизелей.

На рисунке 10 показано общее число концентраций нуклеации при различных нагрузках и частотах вращения двигателя, работающего на дизельном топливе, ULSD, RME50, PME50 и SME50.



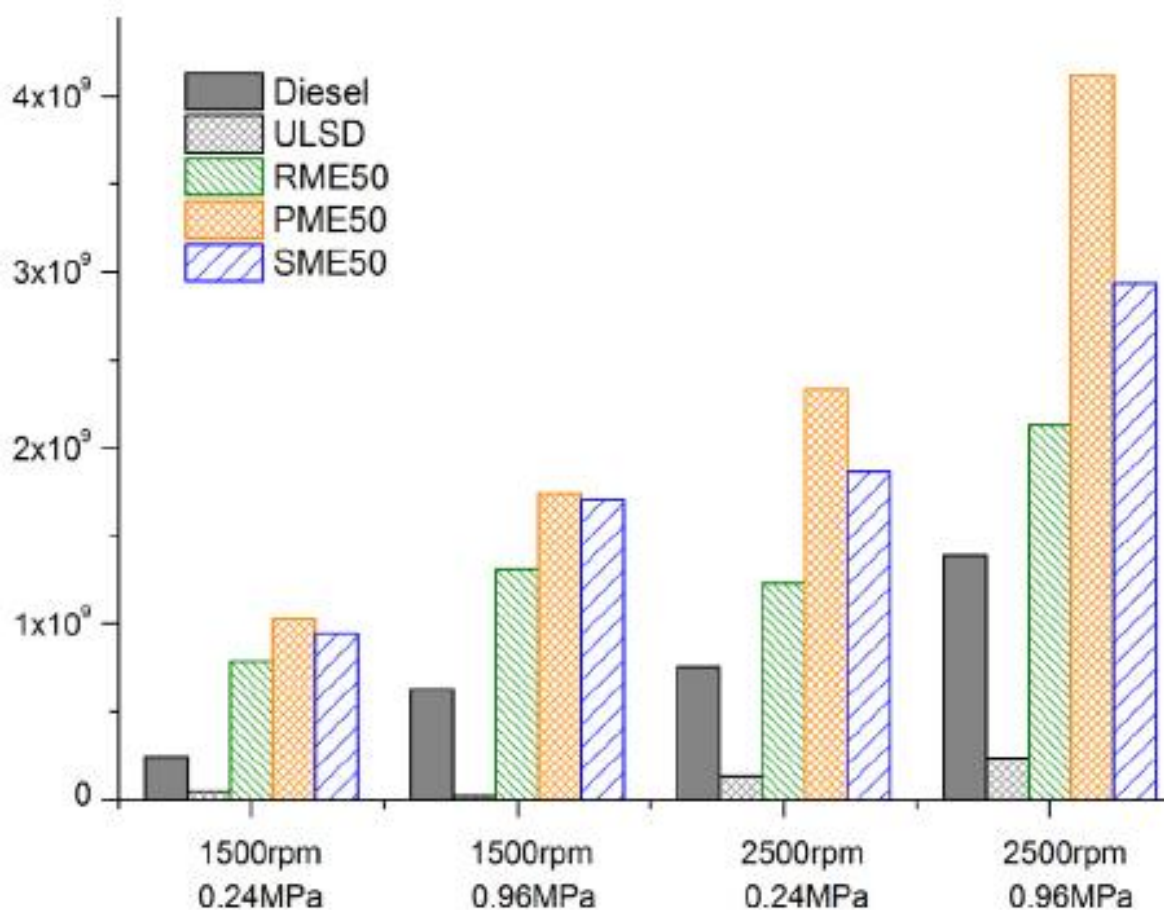


Рисунок 10 – Общая концентрация чисел нуклеации различных видов топлива

Выводы. Для проведенных экспериментальных исследований по сравнению выбросов твердых частиц в ОГ для различных биодизелей с точки зрения состава сложных эфиров жирных кислот можно констатировать, что доля SOF в RME50, PME50 и SME50 в 5 или 4 раза больше, чем в дизельном топливе и ULSD соответственно. Общая последовательность содержания SOF: PME50 > SME50 > RME50. PME50 имеет более высокую концентрацию частиц зародышеобразования, чем RME50 и SME50, из-за более высокой доли насыщенных частиц.

Сырье и состав биодизеля могут быть оптимизированы в ходе производственного процесса для улучшения условия по использованию биодизеля в дизельных двигателях.



СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. E.G. Giakoumis, C.D. Rakopoulos, A.M. Dimaratos, D.C. Rakopoulos. Exhaust emissions of diesel engines operating under transient conditions with biodiesel fuel blends, *Prog. Energ. Combust.* 38 (2012) 691–715.
2. L. Zhu, C.S. Cheung, W.G. Zhang, Z. Huang, Combustion, performance and emission characteristics of a DI diesel engine fueled with ethanol–biodiesel blends, *Fuel* 90 (2011) 1743–1750.
3. M.S. Graboski, R.L. McCormick, Combustion of fat and vegetable oil derived fuels in diesel engines, *Prog. Energ. Combust.* 24 (1998) 125–164.
4. W.G. Wang, D.W. Lyons, N.N. Clark, M. Gautam, P.M. Norton, Emissions from nine heavy trucks fuelled by diesel and biodiesel blend without engine modification, *Environ. Sci. Technol.* 34 (2000) 933–939.
5. A.L. Boehman, J. Song, M. Alam, Impact of biodiesel blending on diesel soot and the regeneration of particulate filters, *Energ. Fuel* 19 (2005).
6. S. Puhan, G. Nagarajan, Effect of biodiesel unsaturated fatty acid on combustion characteristics of a DI compression ignition engine, *Biomass Bioenerg.* 34 (2010) 1079–1088.
7. M. Salamanca, F. Mondragon, J.R. Agudelo, P. Benjumea, A. Santamaria, Variations in the chemical composition and morphology of soot induced by the unsaturation degree of biodiesel and a biodiesel blend, *Combust. Flame* 159 (2012) 1100–1108.
8. M. Lapuerta, O. Armas, J. Rodríguez-Fernández, Effect of the degree of unsaturation of biodiesel fuels on NO_x and particulate emissions, *SAE Int. J. Fuels Lubr.* 1 (2009) 1150–1158.
9. A.Schönborn, N. Ladommatos, J. Williams, R. Allan, J. Rogerson, The influence of molecular structure of fatty acid monoalkyl esters on diesel combustion, *Combust. Flame* 156 (2009) 1396–1412.
10. M.J. Hass, K.M. Scott, T.L. Alleman, R.L. McCormick, Engine performance



- of biodiesel fuel prepared from soybean soapstock: a high quality renewable fuel produced from a waste feedstock, *Energ. Fuel* 15 (2001) 1207–1212.
11. E.G. Giakoumis, A statistical investigation of biodiesel physical and chemical properties, and their correlation with the degree of unsaturation, *Renew. Energ.* (2013) 858–878.
12. M. Lapuerta, O. Armas, M. Herreros José, Emissions from a diesel-biodiesel blend in an automotive diesel engine, *Fuel* 1 (2008) 25–31.
13. R.L. McCormick, M.S. Graboski, T.L. Alleman, A.M. Herring, Impact of biodiesel source material and chemical structure on emissions of criteria pollutants from a heavy duty engine, *Environ. Sci. Technol.* 35 (2001) 1742–1747.
14. R. Vander Wal, A. Tomasek, Soot nanostructure: dependence upon synthesis conditions, *Combust. Flame* 136 (2004) 129–140.
15. E.J. Barrientos, M.M. Maricq, A.L. Boehman, J.E. Anderson, Impact of ester structures on the soot characteristics and soot oxidative reactivity of biodiesel, *SAE Int. J. Fuels Lubr.* (2015) 2015-01-1080.
16. J. Schneider, N. Hock, S. Weimer, S. Borrmann, U. Kirchner, R. Vogt, Nucleation particles in diesel exhaust: composition inferred from in situ mass spectrometric analysis, *Environ. Sci. Technol.* 39 (2005) 6153–6161.
17. Лиханов В. А., Юрлов А. С. Улучшение экологических показателей быстроходного дизеля снижением дымности отработавших газов при работе на альтернативных топливах. Киров : ВГАУ, 2021. 180 с. ISBN 978-5-6045024-6-4. EDN TYGUPA.
18. Лиханов В. А., Россохин А. В. Физико-химические свойства, морфология, структура и реакционная способность частиц сажи отработавших газов дизелей // *Двигателестроение*. 2022. № 3(289). С. 64–69. DOI 10.18698/jec.2022.3.64-69. EDN XLTYRR.
19. Лиханов В. А., Козлов А. Н. Моделирование сажевыделения в дизельном



Вестник Вятского ГАТУ. 2023. № 4 (18). Агроинженерия
двигателе // Двигателестроение. 2023. № 3 (293). С. 51–60.
<https://doi.org/10.18698/jec.2023.3.51-60>.

20. Юрлов А. С. Улучшение экологических показателей быстроходного дизеля снижением дымности отработавших газов при работе на альтернативных топливах : специальность 05.04.02 «Тепловые двигатели»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Юрлов Анатолий Сергеевич. 2022. 253 с. EDN WAKKDX.

21. Лиханов В. А., Лопатин О. П. Исследование процесса сгорания в тракторном дизеле при работе на спирте и растительном масле // Тракторы и сельхозмашины. 2023. Т. 90. № 3. С. 191–200.
<https://doi.org/10.17816/0321-4443-320931>.

