

УДК 621.43

**ВЛИЯНИЕ МЕТИЛОВОГО ЭФИРА РАПСОВОГО МАСЛА
НА ДЫМНОСТЬ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
(ЧАСТЬ 1)**

Юрлов А.С., кандидат технических наук, доцент

E-mail: amadeus_92@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

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

Аннотация. Биодизельное топливо следует рассматривать как часть решения проблемы снижения выбросов сажи в двигателях внутреннего сгорания. Рассмотрено влияние применения метилового эфира рапсового масла на различных частотах вращения и нагрузках на дымность отработавших газов дизельных двигателей при различных пропорциях биодизеля. Были проведены различные исследования двигателей разных размеров, условий эксплуатации и пропорций биодизеля. Экспериментальные результаты показали, что использование биодизеля потенциально может снизить количество основных загрязняющих веществ, типичных для дизелей,

Ключевые слова: биодизель, метиловый эфир рапсового масла, дизельный двигатель, твердые частицы, сажа, дымность, отработавшие газы, скоростные, нагрузочные режимы.

**THE EFFECT OF RAPESEED OIL METHYL ETHER ON THE SMOKINESS
OF THE DIESEL ENGINE EXHAUST GASES (PART 1)**

Yurlov A.S., candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: amadeus_92@mail.ru

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

Annotation. Biodiesel should be considered as one part of solving the problem of reducing soot emissions in internal combustion engines. The influence of using rapeseed oil methyl ether at different rotational speeds and loads on the smokiness of the diesel engines exhaust gases at different proportions of biodiesel is considered. Various studies of engines of different sizes, operating conditions and proportions of biodiesel have been carried out. The achieved experimental results have shown that the biodiesel use can potentially reduce the amount of major pollutants typical for diesels.

Keywords: biodiesel, rapeseed oil methyl ether, diesel engine, solid particles, soot, smokiness, exhaust gases, high-speed, load modes.



В настоящее время биодизель пользуется популярностью в мировом транспортном секторе из-за доступности и простоты современных технологий производства и его совместимости с существующей инфраструктурой применения обычного дизельного топлива [1-6]. Следовательно, биодизельное топливо следует рассматривать как часть решения проблемы снижения выбросов в двигателях внутреннего сгорания, в первую очередь дизельных двигателей. Были проведены различные исследования двигателей разных размеров, условий эксплуатации и пропорций применяемого биодизеля [7-21].

Экспериментальные результаты показали, что использование биодизеля потенциально может снизить количество основных загрязняющих веществ, типичных для дизелей (рисунок 1) [22, 23, 24]. Установлено, что в то же время происходит значительное снижение выбросов диоксида углерода (CO_2) из-за нейтрального эффекта биодизеля и его смесей. Несмотря на то, что сжигание биодизеля и его смесей приводит к выбросам углекислого газа, аналогичным или в некоторых случаях более значительным, чем от дизельного топлива, растительное сырье, используемое в производстве, поглощает выбросы CO_2 из атмосферы при его росте.

Было показано, что сокращение выбросов обусловлено свойствами биодизеля, такими как более высокое содержание кислорода (около 10-12%), более низкий уровень серы и ароматических веществ, а также большая способность к биоразложению по сравнению с дизельным топливом (ДТ) [22, 23, 24].

В целом, при использовании рапсового биодизеля и его смесей в дизельных двигателях при различных условиях работы двигателя наблюдается снижение выбросов твердых частиц (ТЧ, РМ) и дымности ОГ. Авторы объясняют эту тенденцию более высоким содержанием кислорода в рапсовом масле, что способствует окислению твердых частиц [22, 23, 24].



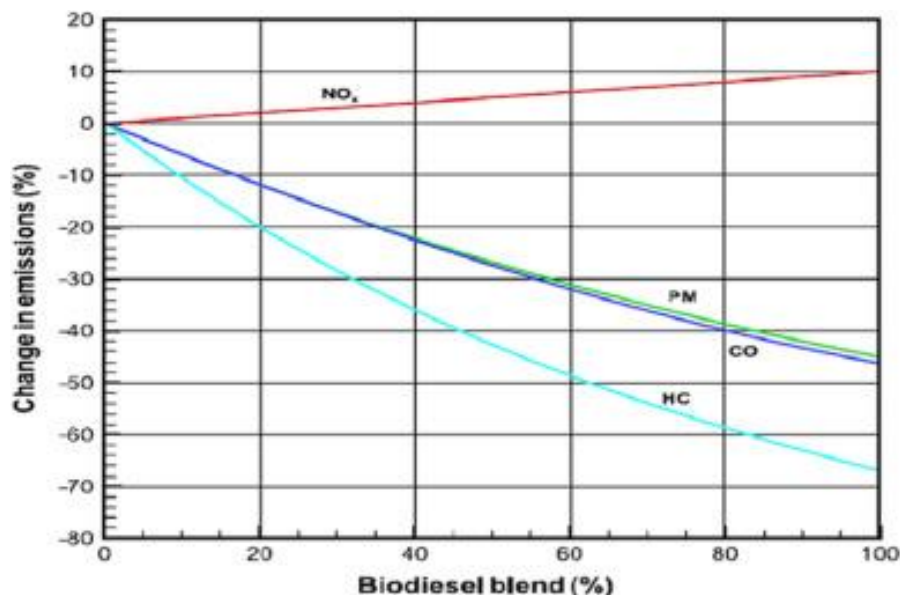


Рисунок 1 – Изменение содержания твердых частиц (PM), NO_x, CO и HC в ОГ дизеля по мере увеличения процентного содержания биодизельного топлива, %

Labeckas G. и Slavinskas S. [25] провели эксперименты на четырехцилиндровом, четырехтактном, безнаддувном дизеле с прямым впрыском, работающим на чистых метиловых эфирах рапса и его смесях (5, 10, 20 и 35%), по объему) при различной нагрузке и частоте вращения двигателя. Результаты показали снижение содержания твердых частиц в биодизельном топливе во всех диапазонах нагрузок и скоростей до 51,6%. Авторы объяснили эту тенденцию связью с диффузионным горением. Твердые частицы образуются на этой стадии процессов горения, в основном при высокой нагрузке. Содержание кислорода в биодизельном топливе улучшает диффузионное сгорание, в результате чего происходит интенсивное окисление образующихся частиц, что более эффективно снижает содержание ТЧ в сжигаемых газах. Hansen et al. [26] испытали влияние метилового эфира рапса и смеси газ-жидкость (GTL) на характеристики выбросов и экономию топлива для дизельного двигателя с прямым впрыском. Результаты экспериментов показали снижение выбросов ТЧ до 60% по сравнению с дизельным топливом,



причем большинство диаметров твердых частиц для метилового эфира рапса находится в диапазоне от 10 до 30 нм, в то время как большинство диаметров твердых частиц для дизельного топлива и газа-жидкости от 30 до 200 нм.

Lemaire et al. [27] исследовали использование смесей метилового эфира рапсового масла (10, 20, 30, 50, 60, 80 и 100% по объему), предварительно нагретых до 70°C в дизельном двигателе с прямым впрыском. Результаты показали, что выбросы ТЧ были сокращены с 20 до 53% для различных смесей биодизеля. Это может быть связано со стадией предварительного нагрева, которая привела к снижению вязкости и последующему улучшению конфигурации распыления, смешивания топлива с воздухом и характеристик сгорания. Di et al. [28] сообщили о более высоком снижении ТЧ при увеличении нагрузки на двигатель. Они объясняют эту тенденцию наличием большего количества кислорода в камере сгорания из-за сжигания большего количества биодизельного топлива, что приводит к лучшему сгоранию и снижению ТЧ.

В работе [29] при 100%-й нагрузке интенсивность дымности ОГ при работе на эмульсии смеси биотоплива была примерно на 29% ниже, чем при работе на чистом ДТ. Эмульгированное топливо хорошо сгорало и при более высоких нагрузках давало температуру ОГ, аналогичную температуре при работе на чистом ДТ. В исследовании сделан вывод о том, что чистое масло-дизельное водоэмульсионное топливо можно использовать в немодифицированном дизеле для повышения термического КПД и снижения токсичности.

Почти при всех нагрузках интенсивность задымления эмульгированного топлива и топлива RO 100 была ниже, чем у режима FD 100 (рисунок 2) [29].

Самый низкий уровень дымности ОГ наблюдался для E1; при полной нагрузке E1 давал на 46% меньше дымности, чем на ДТ. Эмульгированные топлива с лучшими характеристиками горения имели меньшую дымность ОГ, чем на ДТ. Из-за микровзрыва и более высокой скорости испарения эмульсии



биотоплива производили меньше дымности в ОГ; при полной нагрузке эмульсия смеси биотоплива и ДТ давала на 29% меньше дымности, чем соответствующее значение FD100.

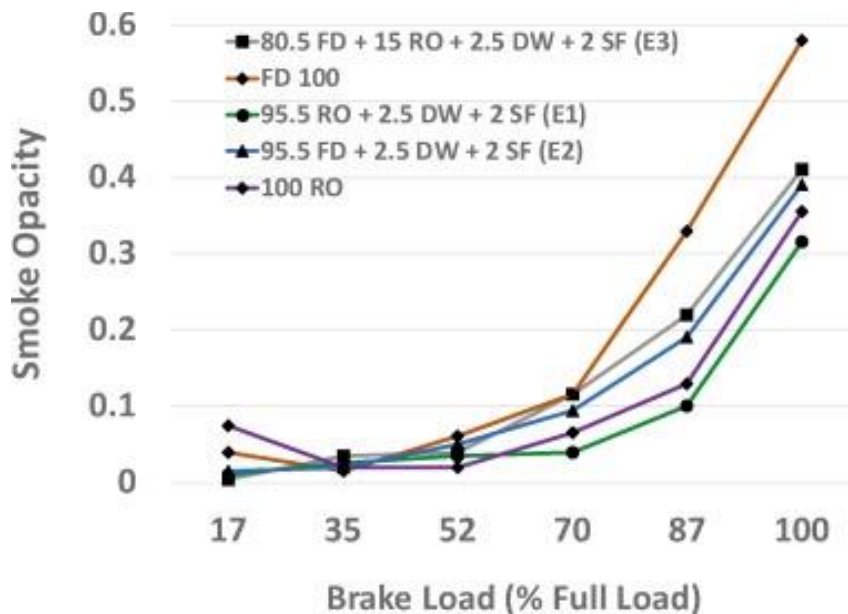


Рисунок 2 – Значения дымности ОГ дизеля от содержания эмульгированного топлива, дизельного топлива и рапсового масла:

100 RO – 100% рапсовое масло; FD 100 – 100% дизельное топливо

В работе [30] три различных типа биодизеля, смешанных с исходным дизельным топливом в 50% об./об.: метиловый эфир рапсового масла (RME 50), метиловый эфир соевого масла (SME 50), сложный эфир пальмового масла (PME 50) были испытаны на дизеле с непосредственным впрыском Cummins 4BTA с турбокомпрессором и промежуточным охладителем. Цель этого исследования – анализ влияния состава жирного эфира на выброс твердых частиц биодизеля из разных исходных материалов. Прозрачность дыма SME 50 (метиловый эфир соевого масла) выше, чем у RME 50 (метиловый эфир рапсового масла) и PME 50 (сложный эфир пальмового масла).



На рисунке 3 [3030] показано влияние применения смесей RME 50, PME 50 и SME 50 на дымность ОГ дизеля Cummins 4BTA при 1500 мин^{-1} и 2500 мин^{-1} в зависимости от нагрузки. Согласно графикам RME50 дает меньшую дымность ОГ, чем ДТ в большинстве случаев во всех тестовых режимах, из-за наличия связанного кислорода и отсутствия ароматического вещества в биодизеле. Увеличение дымности ОГ статистически значимо при уровне достоверности 95%.

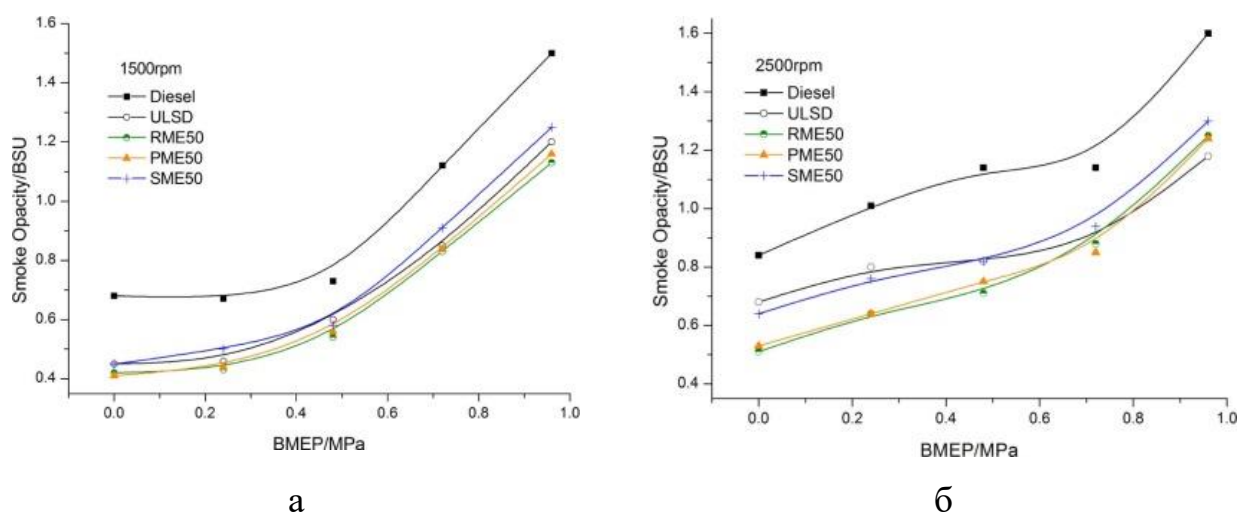


Рисунок 3 – Влияние применения смесей RME 50, PME 50 и SME 50 на дымность ОГ дизеля Cummins 4BTA в зависимости от:

а) нагрузки при $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$; б) 2500 мин^{-1}

Исследования [3131] показали, что в большинстве случаев дымность ОГ, образующаяся при сгорании ДТ, представленная в % EGO, выше, чем дымность при работе на смесях, содержащих компоненты биотоплива (рисунок 4). Эти результаты коррелируют с выводами Corsini et al. [3232], которые обнаружили, что при сжигании биотоплива образуется меньше сажи из-за содержания кислорода в топливе. Исключение наблюдалось только в точках измерения 50 и 75 Н·м для частоты 1500 мин^{-1} , где дымность ОГ при работе на DF была



аналогична смесям ТРО 1 -ТРО 3 (рисунок 4, а). Однако в этих условиях бинарная смесь характеризовалась значительно более низкой дымностью.

Еще одно исключение можно отметить при точке нагрузки 150 Н·м и 1500 мин⁻¹, где, как правило, для всех испытанных образцов наблюдается значительное снижение дымности ОГ.

Таблица 1 – Составы испытываемых образцов биотоплив

DR	DF	ТРО ₁	ТРО ₂	ТРО ₃	ТРО ₄	ТРО ₅	Био ₂₀ -DF ₈₀
50/50 / -	100 / - / -	40/55/5	45/50/5	50/45/5	55/40/5	65/30/5	80/20 / -

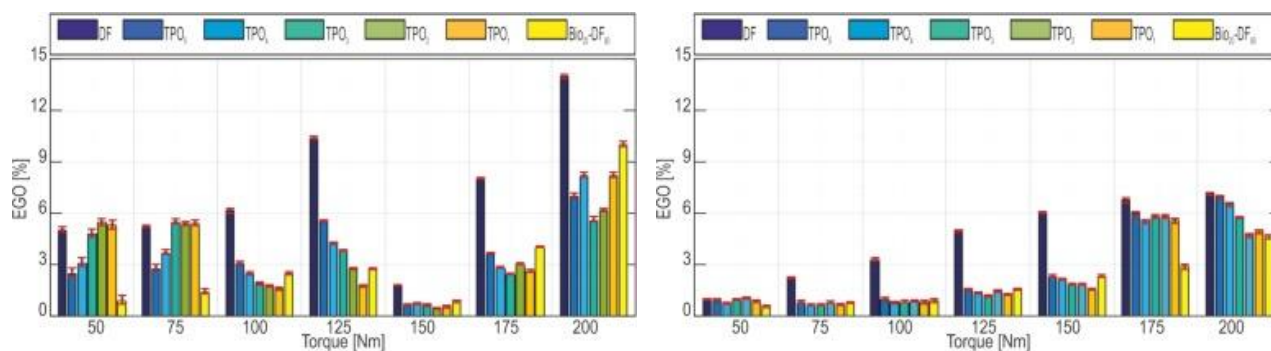


Рисунок 4 – Влияние применения смесей с составом DF / ТРО / DMF [% об.], на дымность ОГ дизеля (4 ЧН 9,4/9,5) Andoria-Mot Poland в зависимости от нагрузки при:

а) $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$; б) 2500 мин^{-1}

DF – дизельное топливо, ТРО – рапсовое масло, DMF – дистиллированная нефтяная фракция средней фракции

Этот результат авторы объясняют изменением стратегии впрыска в этой точке измерения, то есть опережением впрыска основного топлива. Дальнейшее увеличение дымности, несмотря на усовершенствованный впрыск, является результатом увеличения концентрации топлива [32]. При максимальной нагрузке 1500 мин⁻¹ более высокая дымность наблюдалась для образца DF и бинарной смеси. Что касается тройных смесей, было обнаружено, что при 1500



мин⁻¹ они генерировали различную дымность ОГ в отдельных точках измерения.

При более низких нагрузках (50 и 75 Н·м) смеси с более высоким содержанием рапсового масла генерировали более высокий уровень дымности, чем смеси с более низким содержанием этого компонента. В свою очередь, в точках измерения 100 и 125 Н·м тенденция была противоположной, тогда как при более высоких нагрузках четкой тенденции не было обнаружено. В случае испытаний двигателя, проведенных при 3000 мин⁻¹, было замечено, что с увеличением нагрузки с 50 до 200 Н·м дымность ОГ постепенно увеличивалась для всех проанализированных образцов (рисунок 4, б). Более того, при повышении нагрузок для всех смесей, кроме Bio20-DF80, можно наблюдать тенденцию, согласно которой большее содержание компонента биотоплива приводит к более низкой дымности ОГ.

Авторы в работе [33] провели численное исследование девяти различных альтернативных видов биотоплива и чистого ДТ. Сравнение было проведено на одноцилиндровом, безнаддувном с водяным охлаждением, дизельном двигателе с прямым впрыском 1 Ч 8,0/11,0 при различной нагрузке двигателя (20, 40, 60, 80 и 100%), с постоянной степенью сжатия (CR17.5), при более высоком давлении открытия форсунки (220 бар) и опережением времени впрыска (23°CA до ВМТ).

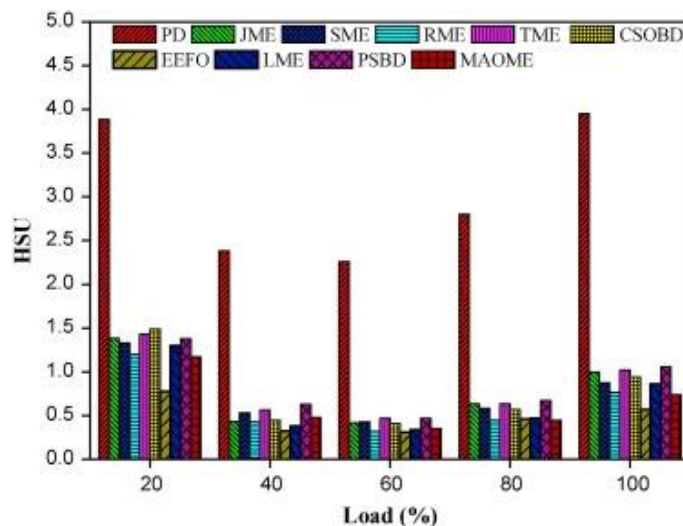
Дымность ОГ при работе дизеля образуется из-за неполного сгорания топлива и крайней недостаточности воздуха. На рисунке 5, а [33] показана дымность ОГ, измеренная на установке Natridge (HSU) с различными тестовыми топливами при различных нагрузках.

Дымность по шкале Natridge HSU дизельного топлива (PD) составляла 3,9501 при полной нагрузке, в то время как у других тестовых топлив было 1,0 (JME – метиловый эфир ятрофы), 0,87538 (SME – соевый метиловый эфир), 0,77 (RME – метиловый эфир рапса), 1,02 (TME – жирный метиловый эфир), 0,94 (CSOBD – масло семян хлопка), 0,57 (EEFO – этиловый эфир рыбьего

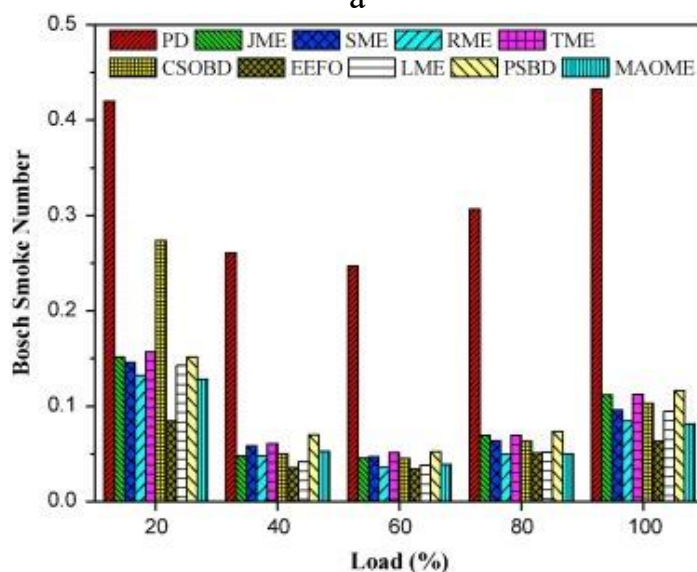


жира), 0,86 (LME – метиловый эфир льняного семени), 1,06 (PSBD – пальмовый стеарин) и 0,74 (MAOME – метиловые эфиры масла микроводорослей).

То есть дымность ОГ дизеля при работе на метиловом эфире рапса составила 0,77 единиц по шкале HSU, снижение составило 3,1801 единиц, или на 80,5% меньше по сравнению с работой на ДТ.



а



б

Рисунок 5 – Влияние применения биотоплив на дымность ОГ дизеля 1 Ч 8,0/11,0 в зависимости от изменения нагрузки измеренной:

а) дымомером Hartridge; б) дымомером Bosch



На рисунке 5, б [33] показано влияние применения биотоплив на дымность ОГ дизеля, измеренную дымомером Bosch (в единицах по шкале Bosch (BSN) при различной нагрузке двигателя при изменении тестовых топлив. Дымность ОГ уменьшается при высоком содержании кислорода в альтернативном топливе, способствуя полному сгоранию топлива даже в богатых зонах.

Дымность ОГ по BSN на дизельном топливе PD при полной нагрузке оказалась равной 0,43263, в то время как у других тестовых топлив было 0,111851 (JME – метиловый эфир ятрофы), 0,09587 (SME – соевый метиловый эфир), 0,08444 (RME – метиловый эфир рапса), 0,11238 (TME – жирный метиловый эфир), 0,10307 (CSOBD – масло семян хлопка), 0,06301 (EEFO – этиловый эфир рыбьего жира), 0,09495 (LME – метиловый эфир льняного семени), 0,11612 (PSBD – пальмовый стеарин) и 0,08161 (MAOME – метиловые эфиры масла микроводорослей). Таким образом, BSN для PD был самым высоким из всех протестированных видов топлива. Для RME – метилового эфира рапса BSN составляет 0,08444 ед. по шкале Bosch, снижение составляет 0,3482 ед. по шкале Bosch, или на 80,5% по сравнению с работой на ДТ.

Наличие высокой температуры во время фазы сгорания в дизельном двигателе и образование богатого топливом сектора способствует образованию сажи за счет зародышеобразования и дальнейшего роста [34, 35].

Выводы. Биодизельное топливо следует рассматривать как часть решения проблемы снижения выбросов сажи в двигателях внутреннего сгорания. Применение метилового эфира рапсового масла на различных частотах вращения и нагрузках влияет на дымность отработавших газов дизельных двигателей при различных пропорциях биодизеля. Исследования показали, что в большинстве случаев дымность ОГ, образующаяся при сгорании ДТ, выше, чем дымность при работе на смесях, содержащих компоненты биотоплива.



Экспериментальные результаты показали, что использование метилового эфира рапсового масла может существенно снижать дымность ОГ дизеля при работе на метиловом эфире рапса и составлять всего 0,77 единиц по шкале NSU. При этом снижение составило 3,1801 единиц, что на 80,5% меньше, чем в сравнении с работой дизельного двигателя на ДТ.

Список источников

1. Лиханов В. А., Сайкин А. М. Снижение токсичности автотракторных дизелей. М. : Агропромиздат, 1991. 208 с. ISBN 5-10-000789-3. EDN XAQVSV.
2. Лиханов В. А., Сайкин А. М. Снижение токсичности автотракторных дизелей : монография. 2-е изд., испр. и доп. М. : Колос, 1994. 224 с.
3. Применение метанола и метилового эфира рапсового масла в дизеле / В. А. Лиханов, О. П. Лопатин, В. Н. Копчиков [и др.]. Киров : ФГБОУ ВО Вятский ГАТУ, 2023. 292 с. ISBN 978_5_6048477_3_2. EDN XCGZJA.
4. Лиханов В. А., Копчиков В. Н., Фоминых А. В. Применение метанола и метилового эфира рапсового масла для работы дизеля 2Ч 10,5/12,0. Киров : ВятскВГСХА, 2017. 226 с. ISBN 978-5-9909914-1-5. EDN YQVAEJ.
5. Лиханов В. А., Фоминых А. В. Исследование рабочего процесса дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на метаноле и метиловом эфире рапсового масла с двойной системой топливоподачи : монография / под общ. ред. В. А. Лиханова ; Вятская государственная сельскохозяйственная академия. – Киров : ВГСХА, 2016. 138 с. ISBN 978-5-9907854-9-6. EDN WTDLNB.
6. Лиханов В. А., Копчиков В. Н. Улучшение экологических показателей дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на метаноле и метиловом эфире рапсового масла с двойной системой топливоподачи путем снижения содержания оксидов азота в отработавших газах : монография. Киров : ВГСХА, 2016. 143 с. ISBN 978-5-9907854-8-9. EDN WSZSKB.



7. Лиханов В. А. Снижение токсичности и улучшение эксплуатационных показателей тракторных дизелей путем применения метанола. Киров : Вятская ГСХА, 2001. 212 с.
8. Гуцин С. Н., Лиханов В. А. Исследование рабочих процессов в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на метанола-топливной эмульсии: монография / под общ. ред. В. А. Лиханова. Киров : Вятская ГСХА, 2006. 120 с.
9. Лиханов В. А. Улучшение экологических показателей дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на метаноле // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2007. № 3. С. 8-11.
10. Улучшение эффективных и экологических показателей дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на метаноле / В. А. Лиханов [и др.] // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2007. № 4. С. 10-13.
11. Лиханов В. А., Глухов А. А. Снижение дымности отработавших газов дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на метаноле с двойной системой топливоподачи : монография / под общ. ред. В. А. Лиханова. Киров : Вятская ГСХА, 2008. 139 с.
12. Улучшение экологических показателей дизеля 4Ч 10,5/12,0 при работе на метаноле с двойной системой топливоподачи : монография / В. А. Лиханов, А. Н. Чувашев, А. А. Анфилатов, А. А. Глухов // под общ. ред. В. А. Лиханова. Киров : Вятская ГСХА, 2009. 334 с.
13. Лиханов В. А., Торопов А. Е. Улучшение экологических показателей дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на метанола-топливной эмульсии путем снижения дымности отработавших газов : монография / под общ. ред. В. А. Лиханова ; М-во сел. хоз-ва Рос. Федерации, ФГОУ ВПО «Вят. гос. с.-х. акад.». Киров : Вят. ГСХА, 2010. 141 с.
14. Лиханов В. А., Романов С. А., Торопов А. Е. Исследование рабочего процесса и улучшение экологических показателей дизеля 4Ч 11,0/12,5



- при работе на метаноле-топливной эмульсии : монография / под общ. ред. В. А. Лиханова ; М-во сел. хоз-ва Рос. Федерации, ФГОУ ВПО «Вят. гос. с.-х. акад.». Киров : Вят. ГСХА, 2011. 237 с.
15. Лиханов В. А., Юрлов А. С. Улучшение экологических показателей быстроходного дизеля снижением дымности отработавших газов при работе на альтернативных топливах. Киров : ВГАТУ, 2021. 180 с. ISBN 978-5-6045024-6-4. EDN TYGUPA.
16. Лиханов В. А., Лопатин О. П. Исследование показателей рабочего процесса быстроходного малоразмерного дизеля при работе на этаноле и рапсовом масле // Двигателестроение. 2022. № 2 (288). С. 61-71. DOI 10.18698/jec.2022.2.61-71. EDN КАЕРУО.
17. 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.
18. Лиханов В. А., Лопатин О. П. Исследование токсичности дизельного двигателя при работе на различных альтернативных топливах // Двигателестроение. 2023. № 2 (292). С. 54-61. DOI 10.18698/jec.2023.2.54-61. EDN RYGLTT.
19. Лиханов В. А., Козлов А. Н. Моделирование сажевыделения в дизельном двигателе // Двигателестроение. 2023. № 3 (293). С. 51-60. <https://doi.org/10.18698/jec.2023.3.51-60>.
20. 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>.
21. Лиханов В. А., Копчиков В. Н., Фоминых А. В. Применение метанола и метилового эфира рапсового масла для работы дизеля 2Ч 10,5/12,0. Киров



22. Rolf D. Directions in internal combustion engine research // *Combust Flame*, 160 (2013), pp. 1-8.
23. Sharon H., Ram P., Fernando K., Murali S., Muthusamy R. Fueling a stationary direct injection diesel engine with diesel-used palm oil-butanol blends-An experimental study // *Energy Conversion Manag*, 73 (2013), pp. 95-105.
24. Varatharajan K., Cheralathan M. Influence of fuel properties and composition on NOx emissions from biodiesel powered diesel engines: a review // *Renew Sustain Energy Rev*, 16 (2012), pp. 3702-3710.
25. Labeckas G., Slavinskas S. The effect of rapeseed oil methyl ester on direct injection Diesel engine performance and exhaust emissions // *Energy Conversion and Management* Volume 47, Issues 13–14, August 2006, pp. 1954-1967.
26. Hansen KF, Jensen MG. Chemical and biological characteristics of exhaust emissions from a DI diesel engine fuelled with rapeseed oil methyl ester (RME). SAE paper 1997, 971689.
27. Lemaire R., Bejaoui S., Therssen E. Study of soot formation during the combustion of diesel, rapeseed methyl ester and their surrogates in turbulent spray flames // *Fuel*, 107 (2013), pp. 147-161.
28. Y. Di, C.S. Cheung, Z. Huang Experimental study on particulate emission of a diesel engine fueled with blended ethanol-dodecanol-diesel / *J. Aerosol Sci.*, 40 (2009), pp. 101-112, 10.1016/j.jaerosci.2008.09.004.
29. Hossain A.K., Refahtalab P., Omran A., Smith D.I., Davies P.A. An experimental study on performance and emission characteristics of an IDI diesel engine operating with neat oil-diesel blend emulsion // *Renewable Energy*, Volume 146, February 2020, pp. 1041-1050.



30. Lei, Cheungb C.S., Huanga Zhen A comparison of particulate emission for rapeseed oil methyl ester, palm oil methyl ester and soybean oil methyl ester in perspective of their fatty ester composition // Applied Thermal Engineering . Volume 94, 5 February 2016, pp. 249-255. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.10.132> Get rights and content.
31. Mikulski M., Ambrosewicz-Walacik M., Duda K., Hunicz J. Performance and emission characterization of a common-rail compression-ignition engine fuelled with ternary mixtures of rapeseed oil, pyrolytic oil and diesel // Renewable Energy. Volume 148, April 2020, pp. 739-755.
32. Corsini, A. Marchegiani, F. Rispoli, F. Sciulli, P. Venturini / Vegetable oils as a fuel in Diesel engine. Engine performance and emissions // Energy Procedia, 81 (2015), pp. 942-949, [10.1016/j.egypro.2015.12.151](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.151).
33. Rajak U., Nashine P., Subhaschandra Singh T., Nath Vermaa T. Numerical investigation of performance, combustion and emission characteristics of various biofuels // Energy Conversion and Management. Volume 156, 15 January 2018, pp. 235-252. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.11.017> Get rights and content.
34. Datta, B.K. Mandal Engine performance, combustion and emission characteristics of a compression ignition engine operating on different biodiesel-alcohol blends // Energy, 125 (2017), pp. 470-483, [10.1016/j.energy.2017.02.110](https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.110).
35. J.B. Heywood Internal combustion engine fundamentals / McGraw-Hill Publishers (1988). ISBN 0-07-028637-X.

