

УДК 621.436.12

**Оптимизация показателей дизеля, работающего на биодизельном
топливе**

А.С. Теренченко, А.В. Козлов, Н.С. Зуев.

(Государственный научный центр Российской Федерации ФГУП «НАМИ»)

**Optimization of diesel engine performance operating on
biodiesel fuel**

A.S. Terenchenko, A.V. Kozlov, N.S. Zuev

NAMI Russian State Scientific Research Center

Актуальность применения альтернативных топлив в дизелях обусловлена исчерпаемостью запасов минерального топлива, а также снижением токсичности отработавших газов. Наиболее актуальной проблемой в дизелях с учетом растущих требований по снижению токсичности отработавших газов является снижение выбросов NO_x и частиц, что возможно осуществить за счет оптимизации рабочего процесса. Хорошо известен тот факт, что довольно сложно добиться одновременного снижения дымности и концентрации NO_x , также известно, что снижения токсичности удается достичь за счет дробления цикловой подачи топлива на две и более частей. Оптимизация рабочего процесса производилась за счет изменения регулировочных параметров топливоподачи, а именно, за счет изменения угла опережения впрыска топлива (УОВТ) и увеличения цикловой подачи топлива как пилотной так и основной при работе на В100. За счет принятых мер удалось достичь одновременного снижения дымности отработавших газов и концентрации NO_x .

Ключевые слова: Биодизельное топливо, рабочий процесс, токсичность отработавших газов, регулировочные параметры топливоподачи, пилотная и основная порции, снижение выбросов NO_x и частиц, двухстадийный впрыск.

The urgency of the using an alternative fuels in diesel engines due to the depletion of fossil fuel reserves, as well as lower emissions. The most urgent problem in diesel engines is to reduce emissions of nitrogen oxides and particulate matters, which can be realized by optimizing of combustion process. It is rather difficult to achieve the reducing nitrogen oxide and particulate matter emissions at the same time, and it's a well known fact, but this problem can be solved by multiple injection. The optimization of combustion process was performed by advanced pilot and main injection timing and increasing of cycle fuel injection. As a result the decreasing of nitrogen oxide and particulate matter emissions was reached simultaneously.

Key words: biodiesel, combustion process, emissions, injection timing, multiple injection, decreasing of nitrogen oxide and particulate matter emissions

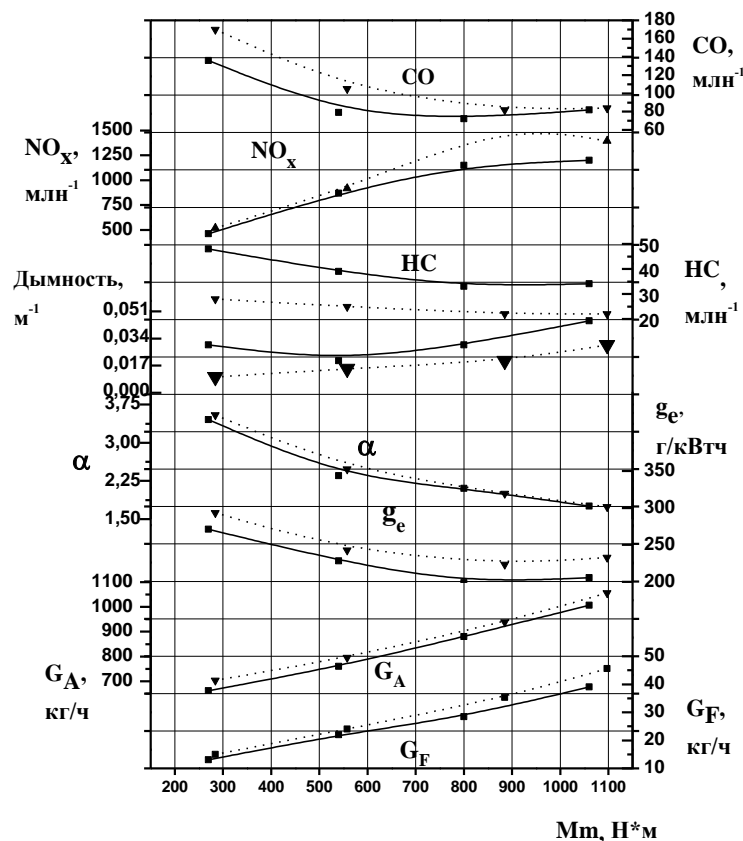
В настоящее время уже 48 стран мира нормативно закрепили и активно развивают производство биотоплива. Активно используются возобновляемые источники энергии из био сырья в США, Бразилии, Японии, Китае, Индии, Канаде, странах ЕС. Проанализировав зарубежный [1-3] и отечественный опыт [4-6] были учтены особенности работы дизеля на биодизельном топливе и приняты необходимые меры, в частности использовался топливный насос высокого давления с применением уплотнительных материалов стойких к воздействию на них биодизельного топлива.

Целью исследования было определение технико-экономических и экологических характеристик дизеля ЯМЗ-6566 при переходе с дизельного топлива (ДТ) на биодизельное (В100), а также оптимизация параметров топливоподачи на В100. Исследования проводились на четырехтактном V-образном шестицилиндровом дизеле Ярославского моторного завода модели ЯМЗ-6566, с размерностью S/D 140/130 мм, степень сжатия 17,5. Максимальная мощность дизеля 197 кВт при 1900 мин⁻¹, номинальный крутящий момент – 1124 Н*м в диапазоне частот вращения 1100 - 1500 мин⁻¹. Блок управления двигателем М240 позволяет обеспечивать двухстадийное впрыскивание топлива в течение рабочего цикла (пилотная и основная порции), также позволяет менять угол опережения впрыскивания топлива для каждой порции. Испытания дизеля проводились на режимах внешней скоростной характеристики и по 13-ти ступенчатому стационарному испытательному циклу ESC (Правила 49 ЕЭК ООН) на моторном стенде, укомплектованном приборами и оборудованием в соответствии с требованиями ГОСТ 14846-81 и ГОСТ Р 41.24-2003.

При переводе дизеля на В100 без изменения настроек топливоподачи наблюдается снижение крутящего момента и эффективной мощности по сравнению с ДТ, максимальная разница на режиме полной нагрузки наблюдается при частоте 1450 мин⁻¹ и составляет 11%. Удельный эффективный расход топлива увеличился в среднем на 14%, оба фактора объясняются более низкой удельной теплотой сгорания В100. Также наблюдается повышение часового расхода топлива, в основном это связано с более высокой плотностью В100 по сравнению с ДТ (0,8832 кг/л и 0,8345 кг/л, соответственно). Коэффициент избытка воздуха для В100 больше чем для ДТ, в среднем разница составляет 3,8%, это объясняется тем, что для

полного сгорания одного килограмма В100, необходимо меньшее количество воздуха (13,3 кг/кг топлива).

Для компенсации потери мощности дизеля при переводе на В100 была увеличена цикловая подача топлива на 14% по массе, что позволило добиться увеличения крутящего момента примерно до уровня крутящего момента на ДТ, а при низких и высоких частотах вращения даже некоторого превышения на 2...5%. Приведенные ниже данные относятся к испытаниям с увеличенной цикловой подачей топлива. При работе дизеля на В100 удельный эффективный расход топлива увеличился в среднем на 13% по сравнению с ДТ. Это объясняется более низкой теплотой сгорания В100. Коэффициент избытка воздуха для В100 меньше чем для ДТ в среднем на 3%, так как увеличился часовой расход топлива. Следствием повышения расхода топлива является увеличение производительности турбокомпрессора и увеличение массового расхода воздуха, однако пропускная способность впускного тракта остается неизменной. Таким образом среднее значение коэффициента избытка воздуха в камере сгорания оказалось выше чем для ДТ. На рисунке 1 представлены сравнительные характеристики результатов испытаний дизеля на В100 с увеличенной цикловой подачей и на ДТ. Для В100 удельный эффективный расход топлива повысился на 8...10%, коэффициент избытка воздуха – на 3%. Также наблюдается снижение концентрации СН на 11...31%, концентрации СО – на 2...18%, дымности – на 42...66%. Концентрация NO_x для В100 выше чем на ДТ на 6...11%, что подтверждается результатами испытаний, проведенными авторами [7-10]. С целью снижения концентрации NO_x , а также получения более низкой дымности отработавших газов чем при работе на ДТ, была проведена оптимизация характеристик топливоподачи.



...▼... В100 с увеличенной цикловой подачей, 1700 мин⁻¹
 —■— ДТ, 1700 мин⁻¹

Рис. 1. Сравнительные характеристики дизеля при работе на ДТ и В100 с увеличенной цикловой подачей на 14% по массе

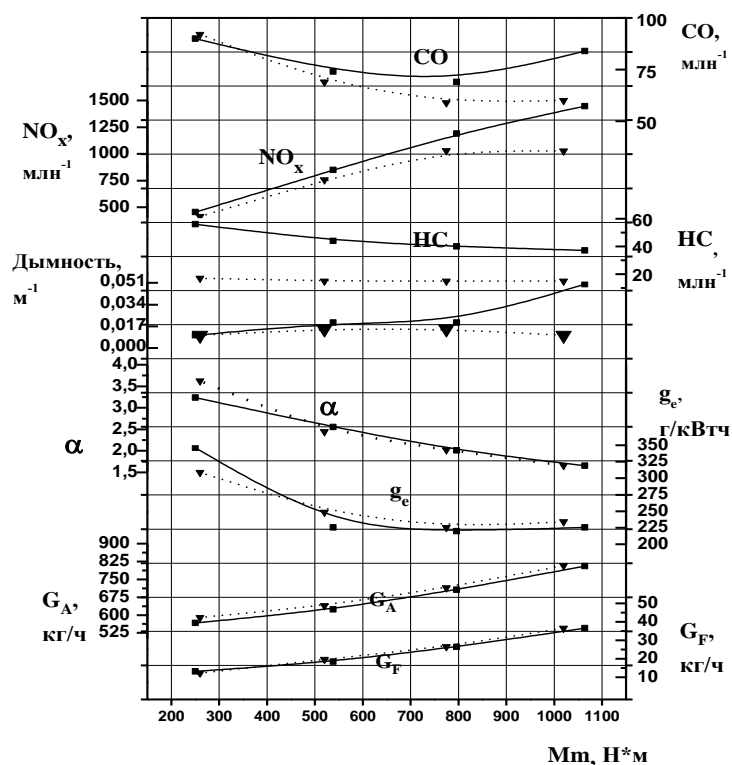
Было исследовано влияние 3-х различных вариантов регулировок параметров топливоподачи на концентрацию СН, СО, NO_x, и дымность, а также удельный расход топлива:

1. Угол опережения впрыска топлива (УОВТ) пилотной и основной порций уменьшился на 3 град. п.к.в.
2. УОВТ пилотной порций уменьшился на 3 град. п.к.в.,
3. Увеличена пилотная порция топлива в 2 раза до 10 мг, величина суммарной цикловой подачи и УОВТ не изменялись.

За счет изменения параметров топливоподачи для В100 удалось достичь снижения концентрации NO_x , а также дымности отработавших газов. Как показали результаты исследования, наилучшим с этой точки зрения оказалось решение уменьшить УОВТ пилотной и основной порции на 3 град. п.к.в. (первый вариант), что совпадает с данными зарубежных исследователей. Снижение концентрации NO_x может быть объяснено снижением максимальной температуры сгорания как за счет более низкой теплоты сгорания топлива, так и за счет более позднего начала сгорания топлива. Снижение дымности при работе дизеля на В100 объясняется химическим составом В100, а именно наличием кислорода в молекуле биотоплива. Как показали результаты испытаний и материалы [1], этого оказалось достаточно для получения еще более низкой дымности, чем при работе дизеля на ДТ, несмотря на уменьшение максимальной температуры цикла [11,12].

На рисунке 2 представлены сравнительные характеристики результатов испытаний дизеля на В100 со штатными регулировками и на В100 с 1-м вариантом регулировки параметров топливоподачи. Концентрация СО для В100 с 1-м вариантом регулировки параметров топливоподачи ниже чем для В100 со стандартными регулировками на 2...20%, NO_x – на 5...30%, СН – на 35...40%, дымность – на 3...62%, для всех перечисленных компонентов отработавших газов характерно увеличение различий с ростом нагрузки. Значение удельного эффективного расхода топлива при работе дизеля на В100 с 1-м вариантом регулировки параметров топливоподачи при нагрузке 25% ниже чем при штатной регулировке на 13%, при нагрузке 50% выше примерно на 15%, далее выше не более чем на 5%. Результаты испытаний для 2-ого варианта показывают, что повышение концентрации NO_x на всех частотах вращения заметно при нагрузке 25% и 100% и составляет 8...16%, наиболее существенная разница соответствует частоте вращения 1700 мин⁻¹.

На других нагрузочных режимах и частотах вращения разница составляет 5...8% в сторону уменьшения концентрации NO_x .



—■— В100 со штатными настройками, 1450 мин⁻¹
 ...▼... В100 с измененными настройками, 1450 мин⁻¹

Рис. 2. Сравнительные характеристики дизеля при работе на В100 со штатными настройками подачи топлива и с уменьшенным на 3 град. п.к.в. углом опережения впрыскивания пилотной и основной порций топлива

Результаты испытаний для 3-его варианта: концентрация NO_x увеличилась на 2...18%, некоторое снижение заметно лишь на частоте вращения 1200 мин⁻¹ при нагрузке 75% и 100% и составляет 5...15%.

Проведенные испытания показали, что применение В100 в качестве топлива позволяет добиться снижения концентрации NO_x в среднем на 20%, дымности на 20...50%. Однако концентрация токсичных компонентов отработавших газов существенно зависит от режима работы дизеля. Также

хочется отметить, что на снижение токсичности отработавших газов оказывают влияние не только иные физические и химические свойства В100 и более поздний УОВТ, но и тот факт, что цикловая подача на В100 была равна цикловой подаче на ДТ. Одним из решающих факторов является более низкая теплота сгорания В100, теплотворная способность единицы массы, впрыснутого в камеру сгорания топлива оказалась меньше, и как следствие оказалась ниже температура сгорания, ниже мощность дизеля, ниже концентрация NO_x . Снижение дымности, как было описано выше, связано с наличием кислорода в молекуле В100. При повышении цикловой подачи В100 на 14% по массе можно наблюдать снижение дымности по сравнению с ДТ на 42...66%, однако при этом концентрация NO_x выше чем на ДТ на 6...11%. Снижение дымности для В100 с более поздним УОВТ и для В100 с увеличенной цикловой подачей происходит в диапазоне 3...62% и 42...66% соответственно. Таким образом, при переводе дизеля на В100 с помощью увеличения цикловой подачи можно добиться увеличения мощности до уровня мощности на ДТ, а с помощью изменения УОВТ и других параметров топливоподачи – снижения концентрации NO_x и дымности отработавших газов.

Для получения более подробной информации о влиянии параметров топливоподачи на изменение токсичности отработавших газов дизеля, работающего на В100 необходимы дальнейшие исследования, в том числе еще большее снижение дымности отработавших газов возможно за счет применения поствпрыска, ожидается что поствпрыск будет создавать дополнительное перемешивание воздушного заряда и продуктов сгорания в камере сгорания дизеля, тем самым, способствуя догоранию сажи [13-15]. Перспективным представляется применение В100 в двигателях с новыми рабочими процессами: НССІ (гомогенное сгорание с воспламенением от

сжатия), PCCI (сгорание предварительно перемешанного заряда с воспламенением от сжатия) и LTC (сгорание при пониженных температурах).

Литература:

- [1] Development of Premixed Low-Temperature Diesel Combustion in a HSDI Diesel Engine / Hanho Y. et al. // SAE Technical Paper. 2008. 2008-01-0639. 17pp.
- [2] Desantes. J. M., Arrègle J., Ruiz S. Characterisation of the Injection-Combustion Process in a D.I. Diesel Engine Running with Rape Oil Methyl Ester // SAE Technical Paper. 1999. №1999-01-1497. 8pp.
- [3] Choi C. Y., Bower G. R., Reitz R. D. Effects of biodiesel blended fuels and multiple injections on D.I. diesel engines // SAE Technical Paper. 1997. 1997-02-24. 20pp.
- [4] Козлов А.В., Теренченко А.С. Анализ процесса сгорания и образования оксидов азота при работе дизеля на дизельном и биодизельном топливах // Производство энергии и биотоплив второго поколения из непищевой биомассы // Сб.науч. тр. НАМИ. 2010. С.87-99.
- [5] Теоретическое и экспериментальное исследование энергетической и эколого-экономической эффективности применения смесевых и биодизельных топлив в дизелях / Кутенев В.Ф. и др. // Двигатели и экология: Сб.науч. тр./ НАМИ. 2006. С.84-94.
- [6] Экспериментальные исследования дизеля ЯМЗ-236НЕ при работе на смесевом В20 и чистом В100 биодизельных топливах / Кутенев В.Ф. и др. // Журнал автомобильных инженеров. 2009. №6. С.20-23.
- [7] Physical and chemical properties of RME biodiesel exhaust particles without engine modifications / Johannes H. Koeglerc et al. // Applied Energy. 2016. Vol 186. 261-269pp.

- [8] Ezio Mancaruso, Bianca Maria Vaglieco. Premixed combustion of GTL and RME fuels in a single cylinder research engine. // *Applied Energy*. 2012. Vol 91. 385-394pp.
- [9] Fuel economy and emission characteristics of Gas-to-Liquid (GTL) and Rapeseed Methyl Ester (RME) as alternative fuels for diesel engines. / Ahmed Hassaneena et al. // *Applied Energy*. 2012. Vol 97. 125-130pp.
- [10] NO_x and soot emissions trends for RME, SME and PME fuels using engine and spray experiments in combination with simulations. / Monica Johansson et al. // *Applied Energy*. 2013. Vol 106. 293-302pp.
- [11] Sakthivel Gnanasekarana, N. Saravananb, M. Ilangkumaranc. Influence of injection timing on performance, emission and combustion characteristics of a DI diesel engine running on fish oil biodiesel. // *Applied Energy*. 2016. Vol 116. 1218-1229pp.
- [12] T. Ganapathya, R.P. Gakkharb, K. Murugesanb. Influence of injection timing on performance, combustion and emission characteristics of Jatropha biodiesel engine. // *Applied Energy*. 2011. 4376-4386pp.
- [13] Bobba, M., Musculus, M., Neel, W., Effect of Post Injections on In-Cylinder and Exhaust Soot for Low-Temperature Combustion in a Heavy-Duty Diesel Engine, *SAE Int. J. Engines* 3(1). 2010.2010-01-0612. 496-516pp
- [14] Experimental Investigation of the Effect of Multiple Injections on Pollutant Formation in a Common-Rail DI Diesel Engine. / Vanegas, A.et al. // *SAE Technical Paper*. 2008. 2008-01-1191.
- [15] Pierpont, D., Montgomery, D., Reitz, R. Reducing Particulate and NO_x Using Multiple Injections and EGR in a D.I. Diesel. // *SAE Technical Paper*. 1995. 950217.