

ПУТИ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ С ОТРАБОТАВШИМИ ГАЗАМИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

**Ф.И. Абрамчук, профессор, д.т.н., А.Н. Кабанов, ассистент,
Г.В. Майстренко, аспирант, ХНАДУ**

***Аннотация.** Рассмотрены пути улучшения экологических показателей дизелей. Обосновывается с точки зрения экологических параметров двигателя необходимость использования топливной аппаратуры Common Rail, рециркуляции отработавших газов и перевода автомобильных дизельных двигателей на сжатый природный газ.*

***Ключевые слова:** дизель, нейтрализация отработавших газов, топливная система аккумуляторного типа, насос-форсунка, рециркуляция отработавших газов, сжатый природный газ.*

Введение

В связи с увеличением количества автомобилей, а также ухудшением экологической ситуации в больших городах возникла необходимость поиска путей уменьшения выбросов вредных веществ (ВВ) автомобильными двигателями. В последние годы все большее распространение на транспорте получают дизельные двигатели. Такими двигателями оснащаются подавляющее большинство грузовых автомобилей, автобусов и сельскохозяйственная техника. Расширяется применение дизелей и на легковых автомобилях.

Известны такие пути улучшения экологических показателей дизельных двигателей:

- нейтрализация отработавших газов;
- улучшение качества топлива;
- применение альтернативных видов топлива;
- улучшение смесеобразования и сгорания;
- рециркуляция отработавших газов (ОГ).

До настоящего времени практически отсутствуют систематизированные данные об уровнях выбросов различных дизельных двигателей. Поэтому в данной статье поставлена задача собрать и проанализировать данные об уровнях выбросов ВВ с ОГ дизелей с различными видами топливной аппаратуры и дизелей конвертированных для работы на сжатом природном газе (СПГ).

Анализ публикаций

Жесткие экологические требования вынуждают моторостроительные фирмы совершенствовать конструкцию дизелей, прежде всего за счет оптимизации формы камеры сгорания и модернизации топливной аппаратуры, так как эти элементы конструкции играют важную роль в смесеобразовании и сгорании, а соответственно и в рабочем процессе дизеля.

Среди автомобилей с дизелями преобладающее значение (83%) имели модели с разделенными камерами сгорания. Эти двигатели имели большие выбросы СН и большой удельный расход топлива. Поэтому в последнее десятилетие разработаны и производятся более экономичные дизели с неразделенной камерой сгорания (с непосредственным впрыском).

А это, наряду с введением более жестких экологических норм, было связано с внедрением топливоподающей аппаратуры и систем автоматического управления и регулирования новых поколений. В табл. 1 приведены данные по выбросам вредных веществ дизелей с ТНВД, системой Common Rail (CR) и насос-форсункой (НФ).

Таблица 1 Выбросы токсичных веществ дизельными и газовыми двигателями

Двигатели	Топливная аппаратура	Вид топлива	СО	СН	NO _x	ТЧ	
СМД – 31А	ТНВД	ДТ	3,8	1,2	17,0		[1]
RAVA-MAN 2156	ТНВД	ДТ	7,0	5,3	11,0	0,5	[2]
RAVA-MAN 2156	газодизель	ДТ+СПГ	7,6	7,5	12,2	0,2	
ЯМЗ-236	ТНВД	ДТ	8,2	6,4	13,0	0,42	[3]
ЯМЗ-236	газодизель	ДТ+СПГ	4,2	5,8	14,3	0,22	
КамАЗ-740	ТНВД	ДТ	9,6	8,2	15	0,64	
КамАЗ-740	–	СПГ	4,2	7,3	12,3	0,08	
Detroit Diesel S 50	НФ	ДТ	10	2,7	7,1	0,125	[4]
Detroit Diesel S 50G	–	СПГ	1,2	2,3	1,8	0,010	
Iveco 8469.41	CR	ДТ	6,8	3,9	6,6	0,50	
Iveco 8469.41 NG	–	СПГ	1,7	3,1	2,5	0,03	
Iveco 491 City Class	CR	ДТ	5,6	3,5	7,6	0,25	
Iveco 491 City Class	–	СПГ	1,4	2,8	2,9	0,03	
Mercedes M 447 h	CR	ДТ	4,4	2,7	6,4	0,50	
Mercedes M 447 hG	–	СПГ	2,0	1,5	3,5	0,05	
Mercedes M 407 h	CR	ДТ	5,1	1,8	9,5	0,13	
Mercedes M 407 hG	–	СПГ	2,0	1,0	4,0	0,03	
Volvo GH10	CR	ДТ	4,2	4,0	7,7	0,267	
Volvo GH10	–	СПГ	0,8	1,3	4,7	0,008	
Caterpillar C-12	НФ	ДТ	7,4	6,6	10,0	0,27	
Caterpillar C-12	–	СПГ	1,4	2,1	5,2	0,011	
Cummins L10-260	CR	ДТ	5,5	4,9	5,0	0,08	
Cummins L10-260G	–	СПГ	2,7	4,0	3,1	0,02	
Cummins C8.3	НФ	ДТ	2,4	1,6	8,2	0,06	
Cummins C8.3G	–	СПГ	1,2	1,3	2,0	0,014	
Cummins B5.9	НФ	ДТ	2,9	1,3	6,7	0,067	
Cummins B5.9G	–	СПГ	1,4	1,1	2,3	0,014	
John Deere 8.1	НФ	ДТ	7,7	2,8	6,0	0,15	

Также в последнее время внедряются программы по конвертации дизельных двигателей в газовые двигатели, и многие фирмы, выпускающие дизели, создают газовые двигатели на их базе. Это прежде всего связано с лучшими экологическими показателями двигателей, работающих на СПГ.

Цель исследования

Целью данного исследования является сравнение количества выбросов ВВ дизельных двигателей, работающих с различными видами топливной аппаратуры, и дизелей, конвертированных для работы на СПГ, а также выбор путей уменьшения этих выбросов.

Снижение токсичности и дымности ОГ дизелей

Главные трудности, которые сильно осложняют улучшение экологических показателей дизелей путем улучшения процессов смесеобразования и сгорания, связаны с тем, что

мероприятия, способствующие уменьшению NO_x, как правило, вызывают рост выброса частиц. С другой стороны, использование нейтрализаторов затруднено из-за наличия большого количества частиц сажи и кислорода (нейтрализация NO_x) в ОГ, а также их относительно невысокой температуры.

В настоящее время применение для дизелей получили лишь каталитические окислительные нейтрализаторы. Они достаточно широко используются для быстроходных дизелей легковых автомобилей и небольших грузовиков. Этому способствует то, что температура ОГ этих дизелей достаточна для окисления СН, СО, растворимых органических составляющих частиц и альдегидов, а с другой стороны, она недостаточна для образования большого количества сульфатов. При высоких температурах в нейтрализаторе сначала выходящий из цилиндров SO₂ окисляется до SO₃, а затем SO₃ взаимодействует с парами воды, органическими и неорганическими частицами, образуя сульфаты, которые суще-

ственно увеличивают количество частиц. По этой причине использование каталитических окислительных нейтрализаторов для дизелей грузовых автомобилей затруднено.

Так как дизель всегда работает на бедной смеси, дополнительной подачи воздуха в систему выпуска с окислительным нейтрализатором не требуется, но, с другой стороны, наличие частиц в ОГ снижает долговечность нейтрализатора.

Свойства дизельного топлива оказывают заметное влияние на эмиссию токсичных веществ. Например, при испытаниях по соответствующим стандартам увеличение цетанового числа топлива уменьшает выброс NO_x дизелями грузовых автомобилей, но приводит к увеличению выброса частиц высокооборотными дизелями легковых автомобилей.

Одновременно с этим для всех дизелей наблюдается снижение выброса CH и CO . Чем больше в дизтопливе легких фракций, тем более однородным будет состав смеси в камере сгорания, что приведет к снижению дымности ОГ и содержания в них NO_x .

Сложную проблему создает присутствие в дизтопливе серы. В частности при работе дизеля с каталитическим окислительным нейтрализатором в последнем при повышенных температурах идет интенсивный процесс образования сульфатов, что резко увеличивает выброс в атмосферу частиц. По нормам Euro 4 массовая доля серы не должна превышать 0,005%.

Уменьшение содержания в дизтопливе ароматических углеводородов может заметно снизить выбросы дизелями канцерогенных веществ.

Изменение состава дизтоплива и разработка новых присадок к нему направлены, в первую очередь, на уменьшение эмиссии NO_x и частиц. Прогнозируется, что изменение состава дизельного топлива в перспективе может дать 10 % снижения NO_x и 30 % уменьшения содержания сажи в ОГ [5].

Альтернативными топливами для дизельных двигателей являются диметиловый и рапсметиловый эфиры. Но в настоящее время не представляется возможность применения

этих топлив в чистом виде, т.к. значительно ухудшаются технико-экономические показатели двигателя, поэтому применяют смесь топлива с рапсметиловым эфиром.

Как уже отмечалось, в последнее время внедряются в производство дизели с неразделенной камерой сгорания и топливopодpодpующей аппаратурой нового поколения. Преимуществом новых дизелей являются высокие давления впрыскивания и возможность управления законом подачи топлива. Использование топливной аппаратуры аккумуляторного типа Common Rail и использование систем автоматического управления и регулирования позволяет обеспечить ступенчатый и многофазный впрыск. Также использование систем Common Rail и насос форсунок позволяет достигнуть высоких давлений впрыска (до 200 МПа), что улучшает распыливание топлива. Этот фактор не только является определяющим в процессе смесеобразования, но и относится к числу факторов, с помощью которых возможно решение противоречивых задач снижения выбросов NO_x , жесткости сгорания, механической нагрузки дизеля с одной стороны и расхода топлива, выбросов твердых частиц, CO , CH – с другой. Преимуществами многофазного впрыска является то, что представляется возможным снизить содержание NO_x в ОГ при хорошем распыливание топлива.

Используя обычную топливную аппаратуру, уменьшение выбросов оксидов азота добиваются с помощью осуществления объемно-плочного смесеобразования, но при этом увеличивается доля несгоревших углеводородов. Из табл. 1 видно, что дизели с системой Common Rail имеют более низкие выбросы ВВ по сравнению с обычными топливными насосами высокого давления (ТНВД).

Жесткие нормы выбросов ВВ все труднее выполнить без использования возможностей гибкого электронного управления. Например, при высоких нагрузках приоритет в регулировании угла опережения впрыска топлива (УОВТ) имеет критерий минимума NO_x , а на малых нагрузках в целях сокращения расхода топлива и дымности он может быть увеличен.

В быстроходном дизеле с обычной характеристикой впрыскивания 75–80 % подачи

осуществлялось за время задержки воспламенения. Повышенная динамичность цикла приводит к перегрузке кривошипно-шатунного механизма, шумности, вибрациям и повышенным выбросам NO_x .

Фактор динамичности можно уменьшить путем формирования пологого или ступенчатого переднего фронта характеристики впрыскивания. Радикальным средством сокращения задержки воспламенения при подаче основной порции топлива является двухфазная подача. Использование аккумуляторных систем Common Rail может рассматриваться как самостоятельное направление или дальнейшее развитие топливоподающей аппаратуры (ТПА) с электронным управлением. По сравнению с обычной ТПА они позволяют оптимально регулировать давление и характеристику впрыскивания, осуществлять многофазную подачу.

Рециркуляция ОГ используется в дизелях с целью уменьшения выброса NO_x (рис. 1). При увеличении степени рециркуляции возрастает длительность задержки воспламенения и уменьшается скорость тепловыделения. Эти эффекты усиливаются при охлаждении рециркулирующих газов. Поэтому целесообразно увеличивать опережение и давление впрыскивания. На полных нагрузках рециркуляция или отсутствует или минимальна, так как вызывает значительный рост выброса сажи и снижение мощности, поэтому она целесообразна на средних и малых нагрузках.

При испытаниях по тринадцатирежимному тесту до 8 – 10 % выброса NO_x приходится на режим холостого хода. По этой причине, а также с целью снижения шума рециркуляция на холостом ходу достигает значительной величины (до 50 %). В целом при испытаниях по тринадцатирежимному циклу уменьшение выбросов NO_x за счет рециркуляции может составить 30 – 75 % [5].

Охлаждение рециркулируемых газов приводит к уменьшению выброса NO_x и частиц при сопоставимых степенях рециркуляции. Этот эффект более значим при больших степенях рециркуляции.

Для высокооборотного дизеля с наддувом, аккумуляторной системой впрыскивания и электрогидравлической форсункой опыты

показали высокую эффективность охлаждения рециркулирующих газов (снижение NO_x и дымности ОГ при неизменном расходе топлива), если обеспечить оптимальное управление степенью рециркуляции и охлаждением ОГ.

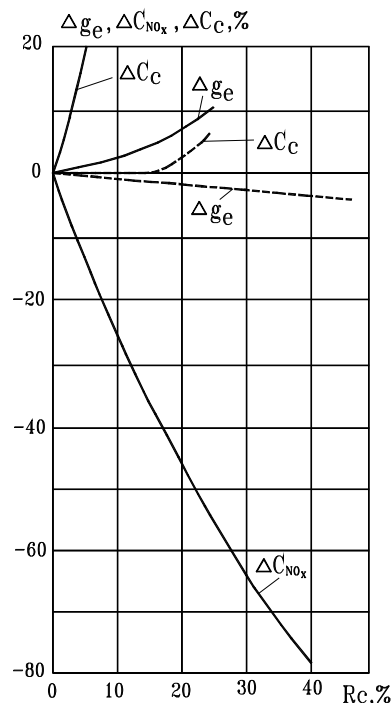


Рис. 1. Обобщенная зависимость удельного эффективного расхода топлива g_e и концентраций оксидов азота C_{NO_x} и сажи C_c в отработавших газах дизеля от степени их рециркуляции R_c : сплошные линии – при работе на режиме с полной нагрузкой; пунктирные линии – на режиме с частичной нагрузкой (около 50% от полной)

Практика показывает, что для выполнения норм Евро 3 средними и большими дизелями без наддува необходимо применять рециркуляцию.

Использование газового топлива

Перевод дизелей на газовое топливо позволяет снизить токсичность и дымность ОГ при одновременном уменьшении затрат на топливо.

Для дизелей легковых автомобилей применяется как сжиженный, так и сжатый природный газ. Дизели грузовых автомобилей пере-

водятся на питание, как правило, сжатым газом, так как использование для них сжиженного газа заметно увеличивает затраты на топливо (относительно сжатого газа).

Дизели конвертируют или в газодизели, или в газовые двигатели с искровым зажиганием. Конвертирование в газодизель технически проще, и, кроме того, сохраняется возможность при необходимости работать по дизельному процессу, т.е. только на дизельном топливе. Однако как видно из табл. 1 при переводе на газодизельный процесс выбросы CO, CH и NO_x увеличиваются, а выбросы ТЧ уменьшаются. Поэтому целесообразнее переводить дизели в чисто газовые двигатели.

При конвертировании дизеля в газовый двигатель с искровым зажиганием можно использовать трехкомпонентный каталитический нейтрализатор и стехиометрическую смесь. Технически реализация этого способа оказывается достаточно сложной, хотя она обеспечивает наилучшие показатели по токсичности ОГ.

Второй вариант, получивший преимущественное распространение, заключается в использовании сильно обедненных смесей (для уменьшения выброса NO_x) и каталитического окислительного нейтрализатора. Применение нейтрализатора при переводе на газовое топливо значительно облегчается (по сравнению с дизелем) отсутствием в ОГ сажи или малым ее количеством (в газодизеле).

Перевод дизелей на чисто газовый процесс получает большее распространение, чем на газодизельный. Экономичность газового двигателя на 15 – 20 % хуже, чем дизеля, и на 5 – 10 % хуже, чем газодизеля. Мощностные показатели безнаддувного дизеля при переводе на газ могут быть сохранены, если на режимах внешней скоростной характеристики соответственно уменьшить коэффициент избытка воздуха (примерно до $\alpha = 1,2$), что, однако, создает трудности с выполнением норм по выбросам NO_x и увеличивает теплонапряженность ряда деталей. При переводе на газ дизеля с наддувом этой проблемы можно избежать, увеличив давление наддува и сохранив «дизельное» значение α по внешней характеристике.

Выводы

В настоящее время используются такие основные пути уменьшения выбросов ВВ с ОГ дизелей как нейтрализация отработавших газов, совершенствование рабочего процесса, применение рециркуляции выпускных газов и перевод дизелей на СПГ.

Изменение состава дизельного топлива может дать 10 % снижения NO_x и 30 % уменьшения содержания сажи в ОГ.

Использование современной топливной аппаратуры позволяет снизить выбросы ВВ за счет управления законом подачи и использованием высокого давления впрыска.

Использование рециркуляции отработавших газов двигателя позволяет достигнуть при испытаниях по тринадцатирежимному тесту уменьшения выбросов NO_x до 30 – 75 %.

Конвертация дизеля в газовый двигатель с искровым зажиганием позволяет обеспечить наилучшие показатели по токсичности ОГ.

Литература

1. Парсаданов И.В. Повышение качества и конкурентозможности дизелей на основе комплексного топливо-экологического критерия. – Харьков: Издательский центр НТУ «ХПИ», 2003. – 244 с.
2. Ковальов С.О., Назаренко К.С. Екологічні аспекти переобладнання дизелів в газодизелі // Автошляховик України. – 2003. – №5. – С. 15.
3. Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А. Топливная аппаратура и системы управления дизелей: Учебник для вузов. – 2-е изд. – М.: Легион-Автодата, 2005. – 344 с.
4. Nils-Olof Nylund, Alex Lawson. Exhaust emissions from natural gas vehicles. IANGV Technical Committee.
5. Морозов К.А. Токсичность автомобильных двигателей: – М.: Легион-Автодата, 2001. – 80 с.

Рецензент: М.А. Подригало, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 11 октября 2007 г.

