

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ, ПОВЫШАЮЩИХ ЭКОЛОГИЧЕСКУЮ БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕПЛОВОЗНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В.А. Рыжов, к.т.н., главный конструктор
ОАО «Коломенский завод»

Принятая в странах Евросоюза и США программа снижения предельно допустимых значений выбросов вредных веществ с отработавшими газами до 2012 г. требует от производителей тепловозных двигателей постоянных усилий, направленных на совершенствование этих показателей. По сравнению с действующими сегодня, значения показателей экологической безопасности должны быть снижены в несколько раз.

Выполненные ОАО «Коломенский завод» исследования обеспечили создание новой модификации тепловозного дизеля Д49 21-29ДГ-01, соответствующего требованиям норм выбросов, вводимых резолюцией ЕС 2004/26 EG в 2009 г. Показатели экологической безопасности дизеля подтверждены сертификатом центра TUV NORD (Германия).

Программа исследований, направленных на перспективу, предусматривала создание научного задела в направлениях использования новых принципов организации рабочего процесса, применения альтернативных топлив и различных технологий очистки отработавших газов.

В России, странах Евросоюза и США действующие предельно допустимые значения технических нормативов выбросов вредных веществ с отработавшими газами (ОГ) тепловозных дизелей различны, но их номенклатура и единицы измерения одинаковы. Это суммарные окислы азота NO_x , окись углерода CO, суммарные углеводороды C_xH_y и твердые частицы PM (Particel Maferiel). Показатель дымности ОГ, который оценивается значением FSN в баллах Bosch с 2003 г. в США и странах евросоюза не применяется. Динамика изменения предельно допустимых значений выбросов вредных веществ представлена в табл. 1.

В России экологические показатели нормируются системой Госстандартов. В странах Евросоюза до 2009 г. нормы выбросов были установлены нормативными документами международного союза железных дорог в форме кодексов UIC, а с 2009 г. будет действовать директива Европарламента 97/68 EG с дополнениями к директиве 2004/26 EG. В США функции нормирования предельных величин выбросов осуществляет Агентство по защите окружающей среды EPA в

форме стандартов Tier. В отличие от стран Евросоюза, стандарты Tier устанавливают значения нормы в г/л. с.ч, причем принята Британская лошадиная сила. Как видно из табл. 1, нормы существенно ужесточаются, что заставляет производителей двигателей постоянно искать и внедрять технологии, обеспечивающие требования стандартов экологической безопасности.

В табл. 2 представлены существующие и перспективные нормы выбросов вредных веществ с отработавшими газами, откуда следует, что к 2012 г. нормы выбросов NO_x и PM ужесточаются в 4 и 10 раз соответственно.

Кроме норм выбросов директивные документы и ряд разъяснительных актов к ним устанавливают методы их измерений и расчета. В частности по правилам UIC и директивы 2004/26 EG обязательными являются следующие методы измерений: для NO_x — хемилюминесцентный; для CO — недисперсный инфракрасный; для C_xH_y — пламенноионизационный и для PM — весовой.

Порядок и режимы испытаний установлены международным стандартом ISO 8178-4 (для тепловозных двигателей цикл F), там же определены порядок расчета удельного средневзвешенного показателя выброса i -го вредного вещества e^p_i по формуле

Таблица 1

Динамика изменения требований директивных документов по экологическим показателям тепловозных дизелей

Источник	Срок действия	Удельные средневзвешенные показатели, г/кВт·ч				Дымовое число (FSN)
		NO_x	CO	HC	PM	
Евро-союз	UIC 1993-1996	16	4	1,6	—	1,6–2,5
	UIC-1 1997-2002	12,0	3	0,8	—	1,6
	UIC-2 2003-2008	9,9	3	0,8	0,25	—
США	Tier 0 1973-2001	12,74	6,71	1,34	0,8	—
	Tier 1 2002-2004	9,92	2,95	0,73	0,6	—
	Tier 2 с 2005	7,38	2,01	0,4	0,27	—

Для двигателей с $P_e \geq 2000$ кВт

Таблица 2

Действующие и перспективные нормы выбросов вредных веществ

Источник	Срок действия	Удельные средневзвешенные показатели, г/кВт·ч				Дымовое число (FSN)
		NO _x	CO	HC	PM	
ГОСТ 51249, ГОСТ 51250	с 2005	12,0	3,0	1,0	—	1,5
УТС-2 Кодекс 624	с 2003	9,9	3,0	0,8	0,25	—
Директива 2004/26 EG	с 2009	7,4	3,5	0,4	0,2	—
Директива 2004/26 EG	с 2012	4*	3,5	—	0,02	—
Tier-2	с 2005	7,38	2,01	0,4	0,27	—
Tier-3	с 2011 по 2014	5,0	2,4	0,6	0,1	—

$$e_i^p = \mu_i \cdot 0,446 \cdot \frac{\sum_{j=1}^m C_{ij} \cdot V_{ор} \cdot W_j}{P_e \cdot \sum_{j=1}^m P_{ij} \cdot W_j} \text{ г/кВт} \cdot \text{ч},$$

где μ_i — молекулярная масса i -го вещества (NO = 46; CO = 28; CH = 13,85); j — порядковый номер режима; i — индекс вредного вещества; C_{ij} — измеренная на режиме концентрация (% объемный) i -го вещества в ОГ; $V_{ор}$ — объемный расход ОГ, м³/ч; P_{ij} — отношение эффективной мощности режима к номинальной мощности; W_i — весовой коэффициент режима.

По циклу F суммарные средневзвешенные показатели определяются по трем режимам — 0, 35 и 100 % мощности по скоростной (тепловозной) характеристике. Влияние каждого из режимов учтено с помощью весовых коэффициентов.

Основными направлениями работ по снижению выбросов вредных веществ являются: совершенствование рабочего процесса (т. е. изменения внутри двигателя), специальные методы обработки топлива и использование добавок к нему, применение альтернативных видов топлива и очистка ОГ во внешних устройствах (т. е. изменения вне двигателя).

Последние несколько лет на ОАО «Коломенский завод» активно ведутся работы по исследованию различных способов снижения выбросов. На рис. 1 представлены основные способы совершенствования рабочего процесса, которые были исследованы с большей либо меньшей степенью глубины реализации.

Известно, что при воздействии на внутрицилиндровые процессы условия снижения NO_x и CO прямо противоположны, поскольку в первом случае необходимо снижать максимальную температуру цикла, а во втором — повышать. Учитывая, что выбросы C_xH_y и PM малочувствительны к максимальной температуре цикла, главной



Рис. 1. Основные способы совершенствования рабочего процесса двигателя

задачей оптимизации рабочего процесса по показателям выбросов следует считать поиск компромиссного сочетания наиболее значимых факторов, обеспечивающий приемлемый уровень экологических показателей двигателя.

Исследования были проведены как теоретически, так и экспериментально на одноцилиндровом отсеке ОД49 и полноразмерном двигателе 21–26ДГ (12ЧН26/26) со степенью форсировки $p_{me} = 19,5$ бар. Параметры рабочего процесса изменяли в следующих диапазонах:

- температура за охладителем наддувочного воздуха $323 \leq T \leq 338$ К;
- степень сжатия $12,5 \leq \epsilon \leq 15,5$;
- максимальное давление сгорания $130 \leq p_{max} \leq 170$ бар;
- фазы продувки $25^\circ \leq \phi \leq 50^\circ$ ПКВ;
- фазы закрытия выпускного клапана $-5^\circ \leq \phi_b \leq +30^\circ$ ПКВ;
- количество фаз подачи топлива 1–3;
- изменение глубины и диаметра горловины камеры сгорания соответственно на 10 мм;
- изменение рециркуляции отработавших газов от 0 до 10 %;
- изменение расхода картерных газов в 2,5 раза;
- изменение угла опережения подачи топлива $5^\circ \leq \theta_o \leq 26^\circ$ ПКВ.

Кроме того, была сделана попытка реализации HCCI процесса (Homogenous Charge Compression Ignition), который, вероятно, может кардинально снизить выбросы NO_x и PM. Однако из-за сложности организации управляемого процесса горения гомогенной смеси при выделении активного

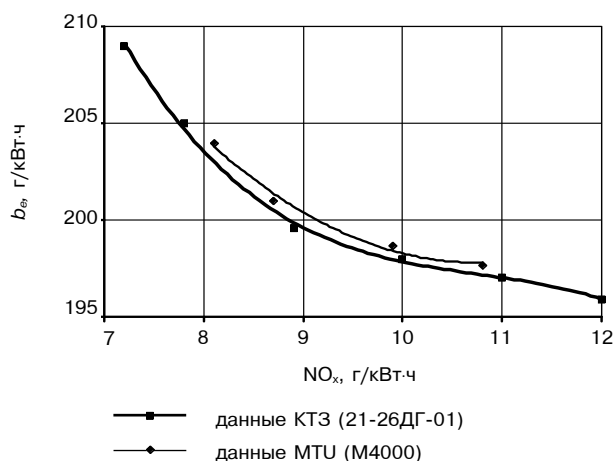


Рис. 2. Изменение удельного расхода топлива и выбросов NO_x при увеличении максимальной температуры цикла

водорода удалось исследовать лишь его отдельные элементы.

Установлено, что соблюдение жестких норм выбросов приводит к заметному росту удельного расхода топлива, что достаточно точно совпадает с результатами исследований западных фирм. Этот факт наглядно иллюстрируется рис. 2, где представлены результаты исследований ОАО «Коломенский завод» и фирмы MTU (дизель 16V4000R 41, доклад на конгрессе СИМАК, 2001, том 2, с. 287).

Аналогичное изменение выбросов NO_x в зависимости от расхода топлива имеет место у двигателей других фирм, лишь незначительно отличаясь по абсолютным значениям b_e и NO_x.

Учитывая, что этот факт оказывает значительное влияние на эксплуатационные расходы, во всем мире ведется поиск способов и технических решений по снижению стоимости жизненного цикла тепловозного двигателя.

Исследования показали, что использование мелкодисперсных водотопливных эмульсий с содержанием воды до 25 % и дисперсностью 2–4 мкм позволяет на различных режимах снизить NO_x до 35 %; CO до 44 % и дымность до 60 % без ухудшения топливной экономичности. В целях практического использования этого способа был разработан генератор ВТЭ с автоматическим обеспечением заданной концентрации воды на входе в ТНВД, что исключает необходимость приготовления и хранения ВТЭ в отдельных баках.

Из исследованных ранее присадок к топливу наиболее эффективной оказалась присадка VISCON (США), обеспечившая снижение выбросов CO на 18–46 %, C_xH_y на 0,7 % и дымности до 35 % при одновременном снижении расхода топлива до 8 %. Выбросы NO_x были снижены на 7 % только на режимах холостого хода.

Существенное влияние на выброс твердых частиц оказывают расход масла на угар, расход картерных газов, качество масла и топлива. Необходимо отметить, что достижение нормы по показателю РМ наиболее трудно достижимо, в сравнении с NO_x, CO и CH. Обеспечить достижение нормы РМ по директиве 2004/26 EG удалось за счет применения малозольного масла, топлива RF-06-03 (аналог нового Российского EN590 по ГОСТ Р52368-2005), поршней повышенной газоплотности и автоматического регулирования разрежения газов в картере (уровень не более 35 мм вод. ст.), при этом расход масла на угар составил 0,32 г/кВт·ч.

Следует особо отметить результаты экспериментов с обработкой части топлива перед ТНВД в плазмо- и термохимических реакторах. Суть обработки заключается в прохождении небольшого количества топлива через зону высоких температур (порядка 10 000 °С), получаемых с помощью низкотемпературной плазмы. Такая обработка значительно повышает термохимическую активность топлива и приводит к значительному снижению выбросов РМ, что свидетельствует о перспективности этого метода. Однако выделяемый при этом свободный активный водород существенно усложняет управление процессом сгорания и на некоторых режимах приводит к взрывному горению. Несмотря на это, перспективность указанной технологии подтверждает необходимость дальнейших исследований.

Весьма эффективным способом снижения выбросов является подача во впускной ресивер перегретого водяного пара, полученного с помощью низкотемпературной плазмы. Наибольший эффект был достигнут при подаче пара в количестве 15–20 % от b_e на режимах до 50 %, при этом выбросы NO_x снижаются на 25–30 % при одновременном снижении выбросов РМ на 20 %. При работе на номинальном режиме наилучший эффект достигается подачей 30 % пара одновременно с реализацией цикла Миллера. В этом случае суммарный эффект по снижению выбросов NO_x составляет 47 %, по CO — 13 %, по дымности на режимах XX и полной мощности соответственно 43 и 8 %. При этом расход топлива увеличивается всего на 1,5 %. Следует отметить, что реализация цикла Миллера требует увеличения давления наддува с 2,5 до 3,5–4 ата при эффективном КПД турбокомпрессора не менее 65 %.

Существенное снижение выбросов вредных веществ и РМ обеспечивает применение альтернативных топлив. Известно множество таких видов топлив, однако с учетом возможностей товарного производства реально могут быть использованы только те из них, которые приведены на рис. 3.

Известно, что абсолютно чистый процесс обеспечивает только использование смеси водорода с кислородом, что абсолютно не реально в локомотивном двигателе.

Обзор публикаций и собственные исследования показывают, что ни один из видов альтер-

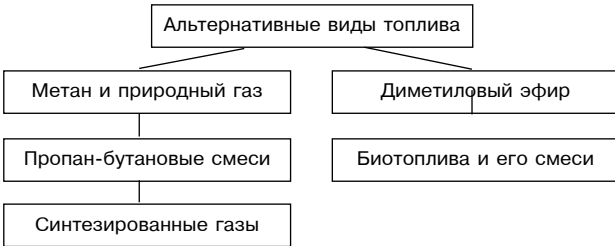


Рис. 3. Виды топлива, используемые для снижения выбросов вредных веществ

Таблица 3

Способы очистки отработавших газов

Устройство	Способ	Производитель транспортной техники
CRT (Continuously Regeneration Trap)	Регенерируемые ловушки-сжигатели частиц	Входят в системы SCR и SCRT
DOC (Continuously Regeneration Trap)	Катализатор окисления	
SCR (Selective Catalytic Reduction)	Селективное каталитическое снижение NO _x	Daimler-Chrysler; Volvo; Renault; Iveco, Cummins
DPF (Diesel Particulate Filter)	Фильтрация твердых частиц	MAN

нативных топлив полностью не решает проблему снижения выбросов. Например, использование метана полностью исключает выбросы PM, но количество NO_x может даже возрасти. Тот же результат дает использование пропан-бутановых смесей и синтезированных газов. Похожий и несколько худший результат обеспечивает использование диметилового эфира (синтезированных углеводородов CH₃-O-CH₃) и метиловых эфиров, полученных на основе растительных масел (биотоплива).

Например, исследование биотоплива RME марки EDIN51606 (рапсовый метиловый эфир) на двигателе 12ЧН26/26 привело к увеличению NO_x на 17 %, снижению CO и CH на 14–16 %, а дымности (FSN) на 12 %. При этом отмечено повышенное нагарообразование на деталях КС. Кроме того, при сжигании биотоплива экономичность двигателя изменяется обратно пропорционально теплотворной способности (т. е. снижается примерно на 11,5 %) и ухудшаются пусковые качества двигателя в холодное время года. Вместе с тем следует отметить, что биодизельное топливо является возобновимым, почти безвредным для человека и окружающей среды, а его применение, в отличие от газовых топлив, не требует никаких дополнительных устройств.

Принимая во внимание результаты проведенных исследований, можно сделать вывод о том, что перспективные нормы выбросов вредных веществ и PM могут быть достигнуты только за счет очистки ОГ, известные способы которой представлены в табл. 3.

Наиболее эффективными являются комбинированные системы SCRT, обеспечивающие трехступенчатую очистку газа: окисление продуктов неполного сгорания (система ДОС), селективное каталитическое восстановление NO_x (система SCR) и фильтрацию PM с последующим дожиганием (система CRT с регенерируемыми дожигателями).

Несмотря на высокую степень очистки газов в этих системах, они преимущественно применяются в автомобильном транспорте и двигателях относительно малой мощности. На двигателях мощностью

ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОР 21-26ДГ-01 С ЭЛЕКТРОННЫМИ ЦИФРОВЫМИ СИСТЕМАМИ УПРАВЛЕНИЯ ТОПЛИВОПОДАЧИ И ПЕРЕПУСКОМ ВОЗДУХА

Дизель-генераторы	Тепловозы	Не (кВт)	Удельный расход топлива г/кВт·ч	Удельный расход масла г/кВт·ч	Ресурс до кап.ремонта тыс. км	Требования по эмиссии	Масса дизеля, кг
21-26ДГ-01	2ТЭ25А	2500	195	0,5	1600	УС 424.2 (до 2009 г) и далее ЕС 2004/26 EG (с 2009 г.)	17800
1А-9ДГ (исп.2)	2ТЭ11Б	2250	207	1,22	1200	ГОСТ Р 81249 (с 2000 г.)	20800

Рис. 4. Новая модификация двигателя семейства Д49 21-26ДГ-01

2000 и более кВт (за исключением судовых) ни одна из систем не применяется, поскольку большой расход ОГ требует резкого увеличения габаритов таких систем, что создает проблему их размещения в тепловозе. При уменьшении габаритов систем очистки ОГ они создают большое противодавление выпуску, что приводит к значительному увеличению удельного расхода топлива. Несмотря на это, работы по созданию таких систем необходимы, поскольку выполнение перспективных норм выбросов без них невозможно.

Результаты исследований ОАО «Коломенский завод» позволили создать новую модификацию двигателя семейства Д49 21-26ДГ-01 (рис. 4). Двигатель предназначен для тепловоза нового поколения 2ТЭ25А (Витязь) и демонстрировался на Международной выставке 2007 г. в Щербинке. Благодаря серьезной модификации ряда узлов и систем было обеспечено выполнение экологических показателей по нормам 2009 г., вводимых Директивой ЕС 2004/26 ЕГ. Соответствие дизеля Д49 21-26ДГ-01 требованиям показателей экологической безопасности Евросоюза было подтверждено сертификатом Германского центра TUV NORD по результатам сертификационных испытаний, проведенных под надзором экспертов TUV NORD на ОАО «Ко-



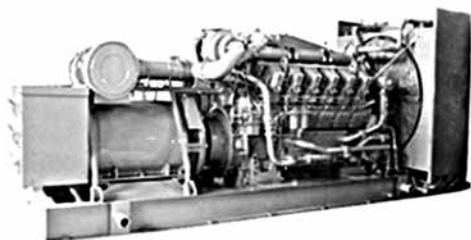
Рис. 5. Отличительные особенности двигателей Д49 четвертого поколения

ломенский завод» в 2006 г. Отличительные особенности двигателя представлены на рис. 5.

Таким образом, тепловозные дизели Коломенского завода сегодня и на перспективу официально признаны соответствующими самому современному техническому уровню.

НА ДВИГАТЕЛЕСТРОИТЕЛЬНЫХ ЗАВОДАХ РОССИИ

Новости ОАО ВДМ



ОАО ВДМ с января 2008 г. приступило к серийному выпуску дизельных и газопоршневых электростанций на базе новейших двигателей.

Разработка, производство и выпуск продукции собственной разработки ведется под контролем всемирно известной компании по конструированию двигателей внутреннего сгорания — AVL (Австрия), которая выполнила новые разработки для фирм-производителей — Cummins, Caterpillar, Waukesha, Perkins и т. д.

В новых двигателях используются 35% основных комплектующих от ведущих мировых производителей, в их числе: коленчатые валы, распределительные валы, втулки и крышки цилиндров, клапаны, поршневые кольца, топливная аппаратура

www.vdm-plant.ru

Новости ОАО РУМО

ОАО РУМО длительное время сохраняет лидирующие позиции в производстве газовых двигателей и газотопкомпрессоров в России. Это было отмечено компанией Altronic Inc. (США), ведущим производителем систем зажигания для газовых двигателей промышленного назначения, представители которой, посетили ОАО РУМО в конце февраля этого года.

Сотрудничество с Altronic ОАО РУМО начало еще в 90-е годы и имеет опыт использования их продукции на своих агрегатах. На этот раз, помимо своих новых систем зажигания Altronic Inc. представила оригинальные системы управления двигателем — компрессором, топливоподачей, системой воздушного пуска и интегральных панелей управления. В ходе рабочей встречи с генеральным директором Европейского отделения Altronic Фрэнком Балком, а также инженером по технической поддержке, менеджером по развитию и главой представительства Altronic в России и СНГ главные конструкторы и ведущие технические специалисты РУМО обсудили возможность применения передовых разработок американской компании на своей продукции и, в связи с этим, возобновления сотрудничества.

www.rumo.nnov.ru