

Новейшие требования к составу выхлопных газов тяговых дизелей

На железных дорогах Германии (DBAG) в настоящее время эксплуатируется около 2700 тепловозов и 2000 дизель-поездов. Главные линии в Европе в основном электрифицированы, но в слабых в транспортном отношении регионах продолжается эксплуатация тепловозов. Используют их также для маневровой работы. При этом существует проблема вредных выбросов, содержащихся в выхлопных газах дизельных двигателей. DBAG поставили целью совершенствовать этот конкурентоспособный вид тяги, свидетельством чего являются многочисленные исследования по данной тематике. В ближайшем будущем придется считаться с распространением на железнодорожные дизели рекомендации EG 97/68, что приведет к законодательному установлению более жестких норм для выбросов.

Содержание вредных веществ в выхлопных газах двигателей у легковых и грузовых автомобилей регламентируется уже в течение длительного времени. Допустимая доля CH, CO, NO_x и PM (частиц сажи) в выбросах постепенно снижается. Для железнодорожного подвижного состава МСЖД (UIC) принял рекомендации по предельным значениям вредных веществ в выбросах. Эти рекомендации DBAG добро-

вольно выполняют при получении разрешений на эксплуатацию нового или модернизированного тягового подвижного состава.

С распространением рекомендации EG 97/68 на железнодорожные дизели требования к содержанию вредных веществ ужесточились по сравнению с нормами МСЖД. Снижение доли вредных веществ в выхлопных газах дизелей может существенно повлиять на эксплуата-

ционные расходы железнодорожного подвижного состава. В связи с этим компания DB Systemtechnik, входящая в состав холдинга DBAG, должна активно поддерживать поиски технических решений по минимизации затрат жизненного цикла (LCC) и разрабатывать в сотрудничестве с промышленностью экономичные и оптимальные для DBAG предложения.

Действующие и новые нормы выбросов выхлопных газов

Значения, рекомендованные МСЖД

Предельные значения, установленные МСЖД, относятся к новым закупаемым дизелям, т. е. к новому и модернизируемому подвижному составу. С января 2003 г. для железных дорог — членов UIC обязательны значения по ступени II (UIC II); однако они не носят характер закона. Изменение по годам допустимого содержания вредных веществ в выхлопных газах приведено в табл. 1.

Рекомендации EG 97/68

С учетом унификации законодательных положений внутри государств — членов ЕС необходимо считаться с включением дизелей подвижного состава в рекомендации EG 97/68. В октябре 2002 г. в Европейском парламенте было принято решение о пересмотре действующих норм; соответствующие предложения еще подлежали согласованию с Советом ЕС, однако больших изменений не ожидалось. Новые предельные значения для выбросов и время введения их в действие приведены в табл. 2.

Предельные значения обязательны с момента вступления их в силу, но при испытаниях двигателей должны соблюдаться уже годом ранее.

В существующем проекте по изменению рекомендаций ЕС предусмотрено, что до 2007 г. значения,

Таблица 1

Предельные значения, рекомендованные МСЖД в разные годы

Источник	Срок действия	Мощность дизеля, кВт	Содержание, г/кВт·ч				Показатель дымности
			CO	CH	NO _x	PM	
UIC — ORE	До 1982 г.	Для всех двигателей	12	4	24		1,6–2,5
UIC — ERRI	До 1993 г.	То же»	8	2,4	20		1,6–2,5
UIC — ERRI	С 1993 г.	»	4	1,6	16		1,6–2,5
UIC — ERRI	С 1993 г.	»	3	0,8	12		1,6–2,5
UIC II	С 2003 г.	<560	2,5	0,6	6	0,25	–
		>560	3	0,8	9,5	0,25	–
		при $n > 1000$ об/мин			9,9		
UIC III	С 2008 г.	<560	2	0,5	4,5	0,15	–
		>560			6	0,2	

Примечание. Величина n — частота вращения вала дизеля.

вводимые с 2012 г., должны быть еще раз проверены на возможность их технической реализации. По сравнению с рекомендациями УИС рекомендации ЕС будут более обширными и строгими. Например, допустимое значение NO_x в сумме со значением СН для моторных вагонов с 2006 г. должно было составить всего 4 г/кВт·ч вместо действующего значения 6,6 г/кВт·ч. Планируется, что в 2012 г. оно будет равно 2 г/кВт·ч. В новых требованиях оговорено также содержание частиц сажи 0,025 г/кВт·ч.

Цикл испытаний

Для оценки изменений выбросов выхлопных газов в настоящее время проводятся измерения по установленному ДИН ИСО 8178–4 циклу для железнодорожного подвижного состава (рис. 1), включающему в себя три режима работы двигателя: холостой ход, частичную и полную нагрузку. Измерения, выполненные в процессе движения, показали хорошее совпадение с установленными в цикле временными составляющими. Особенно важно то, что учтена высокая доля работы дизелей на холостом ходу. Для моторных вагонов в будущем вступит в действие испытательный цикл по ИСО 8178-4C1.

Нормы выбросов для действующих тяговых двигателей

Дизель-поезда

При анализе выбросов наибольшее внимание уделяется окиси азота и саже. Минимизация этих составляющих выхлопных газов является важнейшим требованием при совершенствовании дизелей.

Соблюдение суммарного значения для NO_x и СО, равного 4 г/кВт·ч, что возможно при осуществлении различных конструкторских мероприятий, требует больших дополнительных затрат на приготовле-

Таблица 2

Подвижной состав	Срок действия	Мощность дизеля, кВт	Содержание, г/кВт·ч				
			СО	СН	NO_x	$NO_x + CH$	PM
Моторные вагоны	С 2006 г.	>130	3,5	–	–	4	0,2
Локомотивы	С 2007 г.	<560	3,5	–	–	4	0,2
Локомотивы	С 2009 г.	>560	3,5	0,5	6	–	0,2
Локомотивы	С 2009 г.	>560*	3,5	0,4	7,4	–	0,2
Локомотивы	С 2012 г.	>130	3,5	0,19	2,0	–	0,025
Локомотивы	С 2012 г.	>130	3,5	–	–	4	0,025

* Двигатели мощностью более 2000 кВт с объемом цилиндра более 5 л.

ние топливной смеси (впрыск) и наддув, а также на встраивание системы рециркуляции охлажденных выхлопных газов, предположительно связанной с повышенным расходом топлива.

Обработка выхлопных газов тоже связана с дополнительными затратами. Тем не менее оптимизированная по расходу топлива мощность дизеля может быть сохранена или повышена. Запланированное на 2012 г. предельное значение уже сегодня не представляется экономичным.

В настоящее время выбросы сажевых частиц у существующих дизель-поездов уже ниже лимита, который должны были ввести с 1 января 2006 г. Чтобы достичь запланированного на 2012 г. предельного значения 0,025 г/кВт·ч, потребуется обработка выхлопных газов.

Тепловозы

Выбросы NO_x дизелями существующих тепловозов превышают предельные значения, вводимые в 2007 или 2009 гг. (рис. 2). Соблюдение предельного значения NO_x для дизелей мощностью выше 560 кВт возможно при их модернизации без заметного влияния на эксплуатационные расходы. Снижение же суммарного значения NO_x и СН до 4 г/кВт·ч, как и для дизель-поездов, потребует значительных дополнительных расходов.

Однако мощность дизелей, оптимизированная по расходу топлива, может быть сохранена или повышена.

Выбросы сажи существующими тепловозами (рис. 3) уже ниже значений, допускаемых с 2007 и 2009 гг. Чтобы достичь запланированного на 2012 г. значения 0,025 г/кВт·ч, как и у дизель-поездов, потребуется обработка выхлопных газов.

Технические возможности снижения вредных выбросов

Снижать выбросы вредных веществ можно, осуществляя модернизацию подвижного состава, применяя альтернативные виды топлива или заменяя тепловозы электровозами. Эти мероприятия значительно различаются по технической реализуемости и необходимым инвестициям.

Выбор экономического варианта, позволяющего обеспечить соблюдение предельных значений выбросов, зависит от множества факторов. Запланированные сроки службы под-

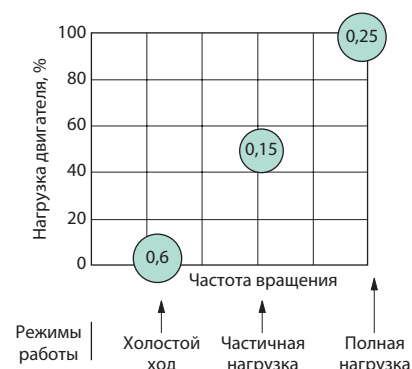


Рис. 1. Цикл испытаний для измерений выбросов выхлопных газов на железнодорожном подвижном составе (в кружках — относительная величина при разных режимах работы дизеля)

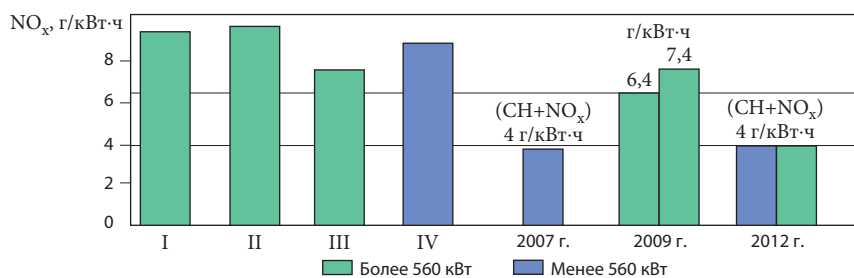


Рис. 2. Сравнение тепловозных выбросов NO_x с предельными значениями, соответствующими рекомендациям ЕС

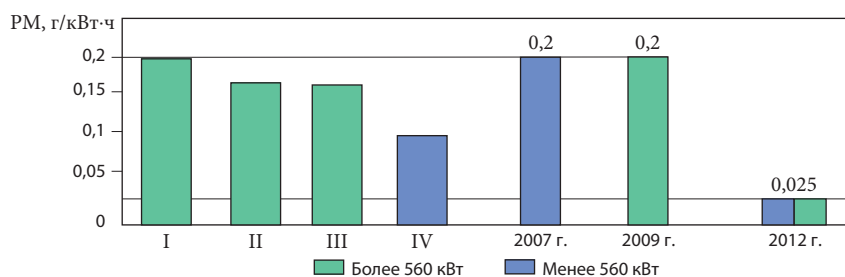


Рис. 3. Сравнение выбросов частиц сажи с предельными значениями, предусмотренными рекомендациями ЕС

вижного состава, годовая провозная способность, закупочные цены на топливо, расходы других материалов и инвестиции на реализацию, представленные в табл. 3, сказываются на эксплуатационных расходах по подвижному составу. Следует также учитывать такие предпосылки, как существующий уровень выбросов дизеля, монтажный объем и масса двигателя.

Общие рекомендации по снижению вредных выбросов дать невозможно, необходимо принимать конкретные решения по сериям дизелей.

Модернизация подвижного состава

Модернизация, направленная на снижение выбросов выхлопных газов, состоит из мероприятий, осуществляемых в двигателях и вне их.

Мероприятия по улучшению конструкции двигателей влияют непосредственно на процесс сгорания топлива и тем самым на образование вредных веществ. Номинальные значения выбросов при этом могут снижаться вследствие

оптимизации процессов сжигания, впрыска и наддува — традиционные способы. Возможно также применение нетрадиционных способов — циркуляции выхлопных газов (AGR), впрыска смеси топлива с водой, метода Миллера. Нетрадиционные мероприятия обуславливают серьезное вмешательство в конструкцию дизеля и, как правило, могут быть реализованы только на новом подвижном составе либо при существенной модернизации дизелей.

Вне дизелей вредные вещества уничтожают или преобразуют с помощью специальных фильтров или катализаторов.

Модернизация дизелей

Между выбросами NO_x и удельным расходом топлива имеется определенная обратная зависимость. Совершенствование метода сжигания, как правило, ведет к снижению расхода топлива и меньшим выбросам сажи или NO_x.

Расход топлива в тяговых дизелях определяет значительную часть затрат на эксплуатацию тягового подвижного состава в течение срока его службы. Однако возможности снижения его расхода ограничены.

В табл. 4 приведены различные способы, позволяющие снизить выбросы NO_x примерно на 30%.

Таблица 3

Достоинства и недостатки различных мероприятий по снижению вредных выбросов

Мероприятие	Достоинства	Недостатки
Замена старых тепловозов	Легкая реализуемость, малые эксплуатационные расходы	Слишком большие инвестиции, ограничивающие возможности применения данного варианта
Модернизация дизелей на подвижном составе	Малые эксплуатационные расходы	Большие затраты, ограниченная реализуемость
Модернизация подвижного состава (мероприятия по совершенствованию дизелей, обработка выхлопных газов)	Относительно небольшие затраты, большие возможности снижения выбросов	Ограниченные средства, неочевидная реализуемость, повышенные эксплуатационные расходы
Применение биотоплива (рапсовое масло, эфиры)	Относительно легкая реализуемость	Незначительное снижение выбросов, повышенные эксплуатационные расходы
Переоборудование на природный газ	Большие возможности для снижения содержания вредных веществ в выбросах	Необходимость в частых заправках, отсутствие соответствующей инфраструктуры
Электрификация	Большой потенциал снижения выбросов	Слишком большие затраты, необходимость долгосрочного планирования

Оптимизация управления дизелем (впрыском топлива) для восстановления NO_x , как правило, ведет к повышению расхода топлива. Этот недостаток можно почти полностью устранить, применив рециркуляцию выхлопных газов. При этом следует иметь в виду необходимость повышения мощности охлаждения и, следовательно, размеров системы охлаждения.

Вследствие увеличения объема топливного бака и массы топлива для одной и той же дальности поездки применение эмульсии топлива с водой пригодно только ограниченно. Восстановление NO_x путем применения этой эмульсии и рециркуляции выхлопных газов следует считать более целесообразным, чем метод Миллера, при котором для устранения повышенного расхода топлива и выбросов сажи необходимо модернизировать наддув. Метод Миллера поэтому пригоден только при незначительном превышении допустимых предельных значений и ограниченном сроке службы.

Обработка выхлопных газов

На легковых автомобилях устройства для очистки выхлопных газов, расположенные вне двигателя, серийно применяют уже примерно 20 лет. В грузовых автомобилях начало их использования планировали на период после введения в 2005 г. следующей ступени предельных выбросов по Euro. На железнодорожном транспорте действуют специальные требования, которые необходимо учитывать при проектировании и изготовлении тепловозов.

Технические требования предусматривают:

- значительное снижение выбросов вредных веществ (NO_x , CO, CH, частиц сажи) в процессе эксплуатации при большой доле работы в режиме холостого хода;
- отсутствие дополнительного шума;
- исключение возможности дополнительных выбросов вредных

веществ, например, вследствие применения добавок;

- большой температурный диапазон (температура выхлопных газов 100–500 °C);
- стабильность по отношению к удельным нагрузкам подвижного состава (частая и быстрая смена температуры выхлопных газов, а также высокие динамические силы, обусловленные контактом колеса с рельсом);
- возможность встраивания в подвижной состав без больших затрат на модернизацию (незначительные потребности в дополнительной площади);
- незначительное противодействие для выхлопных газов.

К эксплуатационным требованиям относятся:

- отсутствие дополнительных операций по обслуживанию;
- длительный срок службы и незначительное старение устройств;
- возможность работы с обычным дизельным топливом;
- низкие затраты жизненного цикла, а именно низкие закупочные цены, эксплуатационные расходы, затраты на обслуживание и ремонты, затраты на удаление отходов.

Способы обработки выхлопных газов различаются по принципу действия, сложности, потребности в дополнительных площади и массе, операциям обслуживания, а также по снижению содержания вредных веществ в выхлопных газах (табл. 5).

Вследствие высокого восстановительного потенциала сажевые

фильтры, системы SCP или SCRT предоставляют большие возможности для снижения выбросов основных компонентов вредных веществ — NO_x и частиц сажи.

DBAG в рамках научно-исследовательских проектов выполнили ряд исследований систем обработки выхлопных газов. В экспериментах с системой SCR, например, было подтверждено 80%-ное восстановление NO_x на тяговых дизелях.

Встраивание систем в действующий подвижной состав и обеспечение их надежности в эксплуатации выдвигают ряд новых требований. На прежних опытных экземплярах подвижного состава достоверных данных о длительной эксплуатации таких систем пока не получено.

Применение биологического топлива

Идея применения биотоплива в качестве альтернативы обычному дизельному на железнодорожном подвижном составе не нова. Ранее проводились эксперименты с рапсовым маслом или его метиловым эфиром, значительно различающимися по влиянию на работу двигателей.

Общим при их использовании является следующее:

- необходимость частой замены масла в типовых условиях эксплуатации при большой доле в цикле работы двигателя режима холостого хода;

Таблица 4

Мероприятия по совершенствованию дизелей

Мероприятие	Влияние мероприятия на показатели		
	Расход топлива	Монтажный объем	Масса
Оптимизация впрыска	Значительно повышается	Не изменяется	Не изменяется
Применение циркуляции выхлопных газов	Несколько повышается		
Введение эмульсии топлива с водой	Не изменяется	На 40% увеличивается объем бака	На 50% увеличивается масса топлива
Метод Миллера	Повышается	Не изменяется	Не изменяется

Таблица 5

Способы обработки выхлопных газов

Способ	Принцип действия	Оборудование для восстановления	Компоненты
Окисление	Катализ	Окислительный катализатор	СН, СО
Фильтрация	Осаждение	Сажевый фильтр	Частицы сажи
Восстановление	Катализ	Система CRT	СН, NO _x , частицы сажи
Окисление + фильтрация	Катализ + осаждение	Система CRT	СН, СО, частицы сажи
Окисление + восстановление + фильтрация	Катализ + осаждение	Система SCRT	СН, СО, NO _x , частицы сажи

Примечание. SCR — избирательное каталитическое восстановление; CRT — непрерывное восстановление и улавливание; SCRT — сочетание двух первых систем.

• потребность в замене полимерных рукавов, фильтров и уплотнений в системе подачи топлива вследствие образования грибка.

Имеются и особые условия для каждого из этих видов биотоплива. Для рапсового масла они заключаются в следующем:

- невозможно его применение в дизелях с непосредственным впрыском без сложных мероприятий по совершенствованию поршня, головок цилиндров, узлов впрыска;
- высокая вязкость масла приводит к необходимости подогрева топлива;
- несколько снижаются мощность и КПД двигателей;
- заметно возрастают выбросы СО, СН, частиц сажи.

Для метилового эфира (RME):

- требуется новая калибровка узла впрыска;
- пропорционально доле RME по отношению к потреблению дизельного топлива повышается расход RME, так что преимущество в затратах уменьшается;
- могут относительно снижаться выбросы вредных веществ: СН до 40%, СО до 32%, NO_x до 15% и сажи до 10%.

Все это необходимо учитывать при выдаче допуска к эксплуатации двигателей на таких видах топлива. Может оказаться актуальным смешивание RME с дизельным топли-

вом, что позволит минимизировать недостатки. Результаты длительных исследований в этом направлении пока отсутствуют.

Следует продолжать работы по созданию синтетического топлива из биомассы. Однако в настоящее время экономичное использование такого топлива на железнодорожном транспорте не представляется возможным.

Использование природного газа

Повышение цен на нефть и исчерпание ее мировых запасов вынуждают искать альтернативные виды топлива. Одним из них является природный газ. Вредных веществ в выхлопе при сжигании природного газа значительно меньше.

Результаты прежних исследований, выполненных для дизельпоездов на сжатом газе и маневровых локомотивов на сжиженном газе, показали, что необходимо целенаправленное совершенствование тяговых приводов, работающих на газе. Жесткие требования к содержанию вредных веществ в выхлопе обусловлены низкой температурой выхлопных газов на холостом ходу. Для полного использования экономических и экологических возмож-

ностей газовых приводов необходимы большие затраты на их совершенствование.

Выводы

Планируемые в рекомендациях EG 97/68 предельные значения содержания вредных веществ в первую очередь относятся к новым или модернизируемым дизелям тягового подвижного состава. Однако ЕС предполагает установить лимиты на вредные выбросы и для действующего подвижного состава. Это имеет далеко идущие последствия для железнодорожных операторов. Оборудование подвижного состава новыми дизелями, выбросы которых совместимы с лимитами, дооборудование его устройствами для обработки выхлопных газов станут необходимыми.

Соблюдение ступени III рекомендаций EG 97/68 (с 2006–2009 гг.) возможно при совершенствовании конструкции дизелей, что, однако, сопровождается высокими инвестициями и заметным увеличением расхода топлива. Устройства для обработки выхлопных газов могут уменьшить эти дополнительные затруднения при оптимизированной по мощности регулировке дизелей.

В настоящее время представляется, что планируемые в 2012 г. предельные значения выбросов реализуемы только при наличии обработки выхлопных газов. Использование на железнодорожном транспорте опыта, полученного на грузовых автомобилях, и его масштабирование к цели не ведут. Требуются дальнейшие исследования, которые позволят обоснованно оценить пригодность указанных технологий для железнодорожного транспорта.

T. Köhler. Eisenbahntechnische Rundschau, 2004, № 6, S. 376 — 381.