

# Снижение вредных выбросов при тепловозной тяге

Железные дороги Германии (DB) много энергии расходуют на тягу как в грузовых, так и в пассажирских перевозках. Примерно 10% затрачивается на тепловозную тягу. В рамках требований к этому виду тяги — совместимость с окружающей средой, мобильность, снижение вредных выбросов — рассмотрены технические и экономические возможности уменьшения негативных воздействий тепловозной тяги на окружающую среду.

## Вредные выбросы от транспортных средств

Работа различных технических средств железнодорожного транспорта сопровождается выбросами вредных веществ. Однако сравнение железных дорог с другими

видами транспорта показывает, что выбросы окислов азота и сажи минимальны (рис. 1–3). Это в решающей степени обусловлено незначительными выбросами при электрической тяге, на которой DB выполняют более 90% всего объема перевозок.

Ситуацию с вредными выбросами при тепловозной тяге характеризуют данные, приведенные на рис. 4.

По абсолютным значениям выбросы окислов азота и сажи постоянно снижаются. Устойчивое длительное снижение вредных выбросов объясняется как уменьшением расхода дизельного топлива вследствие снижения объема перевозок, выполняемых поездами на тепловозной тяге (на 65% по сравнению с 1990 г.), так и применением тепловозов и дизель-поездов нового поколения с современными двигателями. Тем не менее удельные значения вредных выбросов тепловозной тяги заметно превышают этот показатель электрической тяги (табл. 1 и 2).

В целом тепловозная тяга лишь ограниченно конкурентоспособна по отношению к другим видам транспорта, и ее экономические преимущества по сравнению, например, с автомобильным

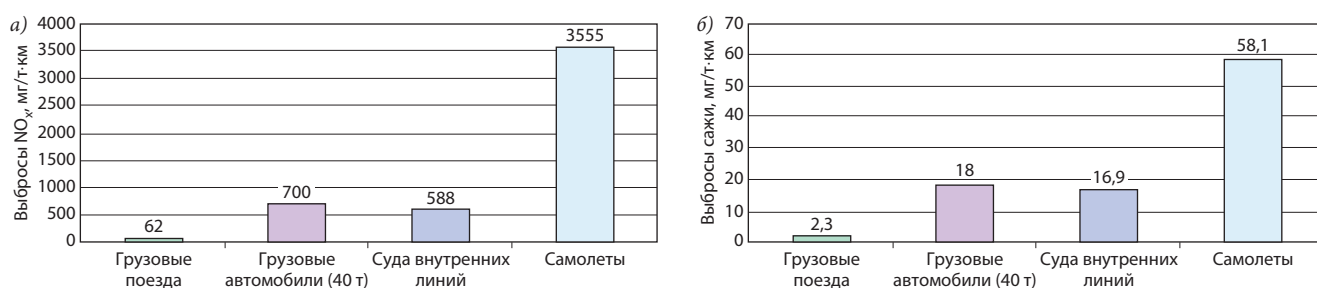


Рис. 1. Выбросы окислов азота (а) и сажи (б), создаваемые в Германии грузовыми поездами и другими видами грузового транспорта

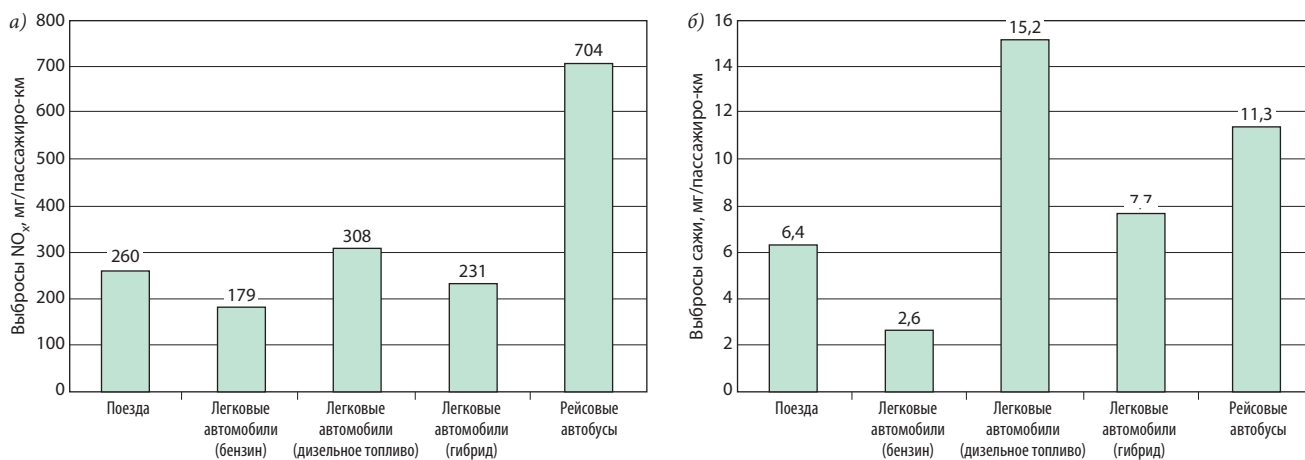


Рис. 2. Выбросы окислов азота (а) и сажи (б), создаваемые поездами и другими видами транспорта в пригородных сообщениях

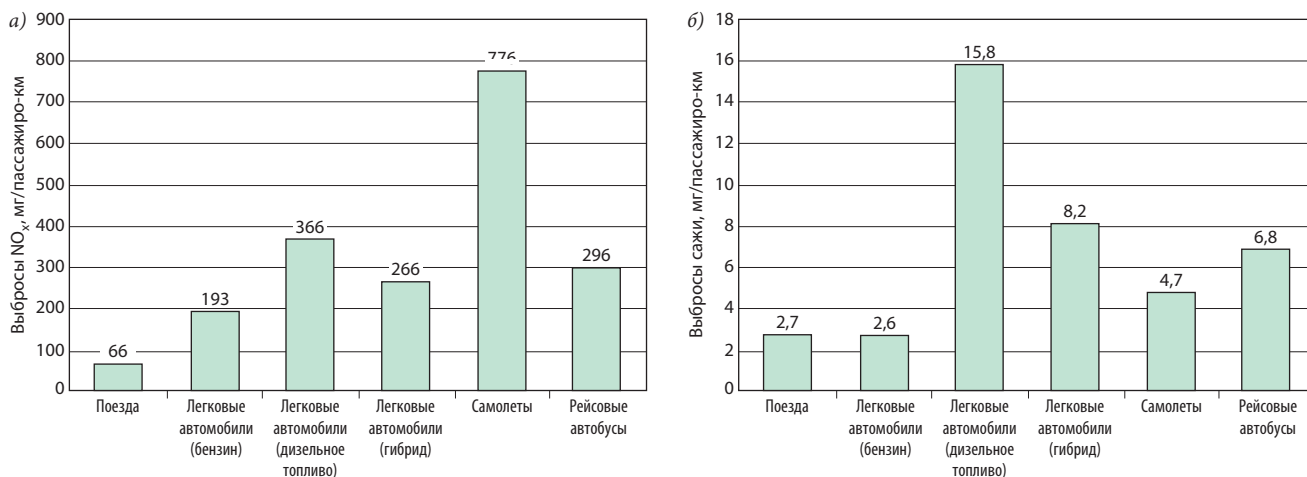


Рис. 3. Выбросы окислов азота и сажи, создаваемые пассажирскими поездами дальних сообщений и другими видами транспорта

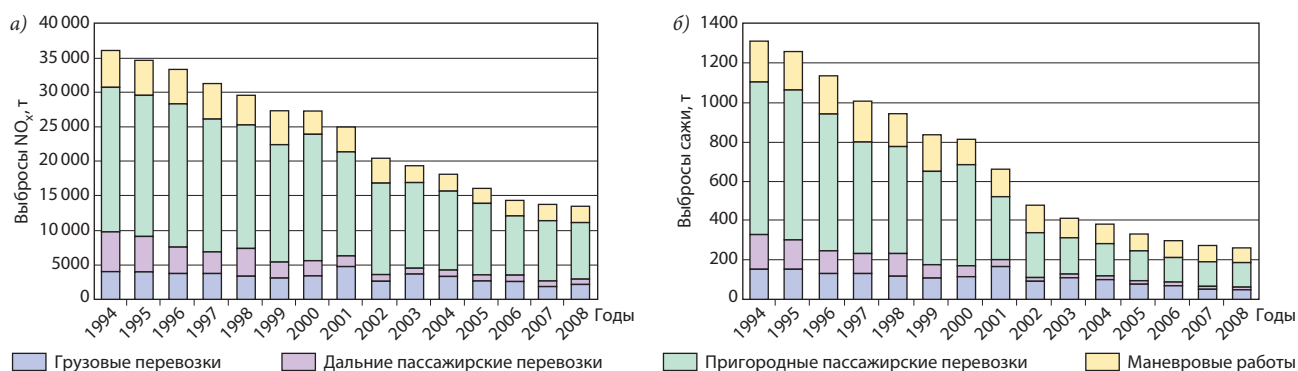


Рис. 4. Динамика вредных выбросов от дизельной тяги на DB за 15 лет:  
а – окислы азота; б – сажа

транспортом заключаются только в меньшем расходе энергии и пониженных выбросах CO<sub>2</sub>. По удельным показателям на 1 км пробега дизельная тяга проигрывает электрической. В то же время отдельные дизель-поезда с современными дизелями в региональных перевозках показывают вполне приемлемые

результаты при сравнении с конкурирующими видами транспорта. Железные дороги Германии и других стран должны приложить значительные усилия, чтобы в будущем в секторе перевозок по неэлектрифицированным линиям отвечать растущим экологическим требованиям.

### Целевые установки DB по снижению вредных выбросов

В Германии доля загрязнений и вредных выбросов, приходящаяся на тепловозную тягу, в общих размерах выбросов относительно мала – 2,1% по окислам азота и 0,4% по частицам

Таблица 1

Удельные выбросы окислов азота по видам перевозок

Вид железнодорожных перевозок	Выбросы при тяге		Общая величина выбросов при тяге, включая маневровые работы
	электрической	тепловозной	
Грузовые, мг/т·км	19	492	62
Пассажирские дальних сообщений, мг/пассажиро-км	42	1017	66
Пассажирские пригородные, мг/пассажиро-км	65	1418	260

Таблица 2

Удельные выбросы сажи по видам перевозок

Вид железнодорожных перевозок	Выбросы при тяге		Общая величина выбросов при тяге, включая маневровые работы
	электрической	тепловозной	
Грузовые, мг/т·км	1,1	14	2,3
Пассажирские дальних сообщений, мг/пассажиро-км	2,4	14	2,7
Пассажирские пригородные, мг/пассажиро-км	3,7	22	6,4

сажи. Однако на отдельных линиях величина удельных выбросов тепловозных дизелей в расчете на 1 км в год часто в несколько раз выше, чем от автомобильных перевозок.

Европейскими директивами по качеству воздуха (RL 96/62 EG), принятыми в 1996 г., установлены единые для всей Европы нормы вы по измерению и оценке состава и объемов вредных выбросов. В сентябре 2002 г. вступило в силу 22-е федеральное постановление о защите от загрязнений (BIMSchV), вытекающее из этих директив. В нем даны конкретные предельно допустимые значения и ступени опасных загрязнений применительно к содержанию окислов серы, углерода и азота, а также твердых частиц, озона, бензола и свинца. Для транспортной отрасли в первую очередь важны предельные значения окислов азота и частиц сажи.

Постановление BIMSchV оговаривает предельные значения и допуски на содержание окислов азота и мелкодисперсной пыли со средним размером частиц 10 мкм (PM<sub>10</sub>). В части, касающейся мелкодисперсной пыли, оно вступило в силу 1 января 2005 г., а в части окислов азота — 1 января 2010 г.

Указанные предельные значения являются обязательными для всех

транспортных предприятий, и пострадавшие от их превышения могут обращаться в суд. За контроль качества воздуха и соблюдение предельных значений несут ответственность федеральные земли. Если установлено превышение предельных значений загрязнения окружающей среды, в этом случае согласно §47 федерального закона о защите от загрязнений (BIMSchG) разрабатывается план, предусматривающий мероприятия по обеспечению снижения загрязнений. С этой целью могут быть предложены программы помощи, а также введены соответствующие ограничения и запреты. К выполнению этих мер привлекаются все виновные с учетом их доли в общем превышении загрязнений.

Постановление BIMSchV и закон BIMSchG четко устанавливают ограничения и запреты на перевозки. По состоянию на март 2011 г. в Германии объявлены экологически чистыми 43 зоны и запланированы еще две. Административно-правовые рамочные условия предусматривают ограничение в таких зонах железнодорожных перевозок. Железнодорожные компании должны участвовать в работах по улучшению ситуации с загрязнениями.

В апреле 2004 г. были внесены изменения в европейские директи-

вы по качеству воздуха RL 97/68 EG; закрепленные в них обязательные предельные значения вредных выбросов применительно к новым железнодорожным дизелям являются соответствующим ориентиром для изготовителей подвижного состава и косвенно касаются эксплуатирующих его владельцев (табл. 3).

*Задачи DB по защите климата.* Законодательные нормы по снижению вредных выбросов нельзя рассматривать независимо друг от друга, так как изменения величины выбросов окислов азота, образующихся при сгорании топлива, находятся в обратной зависимости от содержания CO<sub>2</sub> и ряда других компонентов в выхлопных газах.

Норма обязательного снижения удельных выбросов CO<sub>2</sub> в производственных процессах на DB — главная стратегическая задача концерна. Эти выбросы до 2020 г. должны быть снижены на 20% по сравнению с имевшими место в 2006 г. В связи с необходимостью снижения выбросов частиц сажи и окислов азота указанная ранее обратная зависимость обуславливает возникновение классического конфликта целей, который может быть разрешен только путем выполнения соответствующих взаимно согласованных технических и эксплуатационных мероприятий.

Таблица 3

**Предельные значения вредных выбросов для железных дорог согласно директивам RL 97/68 EG**

Ступень	Мощность, кВт	Срок ввода в действие	Предельные значения удельного содержания в выбросах, г/кВт·ч			
			окиси углерода	углеводородов	окислов азота	сажи
<i>Моторные вагоны</i>						
ША	Все значения	Январь 2006 г.	3,5	4		0,2
ШВ		Январь 2012 г.		0,19	2	
<i>Локомотивы</i>						
ША	< 560	Январь 2007 г.	3,5	4		0,2
	> 560	Январь 2009 г.		0,5	6	
	> 2000 (> 51 кВт на цилиндр)			0,4	7,4	
ШВ	Все значения	Январь 2012 г.	4		0,026	

**Технические подходы к решению экологических проблем**

Расход топлива подвижным составом и создаваемые им вредные выбросы можно минимизировать, если применить инновационные приводы, использующие энергию торможения, интеллектуальное управление вспомогательными устройствами, оборудование облегченной конструкции. На величину выбросов влияют и другие факторы — конструкция ряда узлов и агрегатов подвижного состава, вид графика движения, режим ведения поезда, характер трассы.

*Инновационная концепция — гибридный привод.* Анализ баланса энергии привода рельсового подвижного состава показывает, что можно с пользой использовать энергию торможения. Распределение энергии привода, схематично представленное на рис. 5, в основном зависит от профиля пути. Потенциал полезного использования энергии торможения (рекуперации) достигает 25%.

На электроподвижном составе рекуперация осуществляется уже давно. Здесь рекуперированная энергия передается в питающую систему через контактную сеть. На тепловозах и дизель-поездах для приема рекуперированной энергии необходим аккумулятор.

При сочетании приводов нескольких типов образуется так называемый гибридный привод. Наиболее широко распространено сочетание двигателя внутреннего сгорания и электродвигателя с аккумуляторной батареей или мощной батареей конденсаторов. Возможно также применение механических или пневматических аккумуляторов.

Гибридные приводы могут быть параллельные и последовательные. В параллельном гибридном приводе оба двигателя, как правило, механически соединены, работают вместе, перемещая локомотив. При последовательном гибридном приводе двигатель внутреннего сгорания только приводит во вращение генератор, от которого получает питание электрический двигатель.

Различают гибридные приводы средней и полной мощности. В первом электрический двигатель, мощность которого составляет 10–15% мощности двигателя внутреннего сгорания, используется для усиления вращающего момента на выходе. В этом случае полезно используется уже подготовленная энергия, полученная в процессе торможения, когда электрическая машина работала в генераторном режиме.

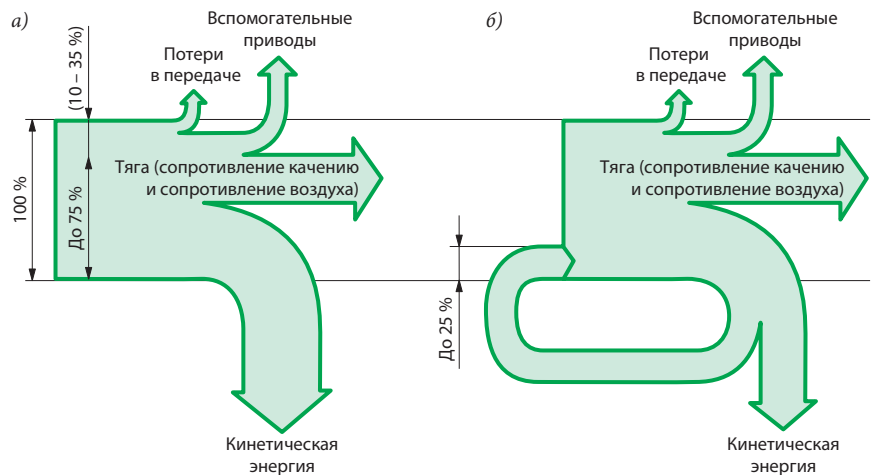


Рис. 5. Распределение энергии тягового привода:  
а — без рекуперации; б — с рекуперацией

В так называемом приводе полной мощности движение осуществляется только с использованием накопленной электрической энергии. В этом случае мощность электрической машины должна составлять 30–50% мощности двигателя внутреннего сгорания.

В зависимости от концепции гибридного привода и характеристик его компонентов при эксплуатации подвижного состава могут быть применены новые стратегии управления приводом, обеспечивающие следующее:

- прибытие на станцию и отправление поезда без вредных выбросов (включены только электрические тяговые двигатели);
- отключение дизеля при остановке на станции;
- снижение мощности двигателя внутреннего сгорания;
- возможность работы при отказе стартера, электрического генератора бортовой сети или аккумуляторной батареи;
- повышение мощности тягового привода для ускорения разгона;
- проследование населенных зон без вредных выбросов;
- движение на выбеге при отключенном двигателе внутреннего сгорания.

Существуют различные соображения и концептуальные идеи по

созданию подвижного состава с несколькими видами приводов и аккумуляторами в соответствии с рассмотренной архитектурой.

При оснащении действующего подвижного состава гибридным приводом следует соблюдать баланс масс и принимать во внимание имеющиеся в распоряжении монтажные пространства.

*Управление вспомогательным оборудованием.* В пассажирских перевозках около 25% энергии, потребляемой тяговым подвижным составом с дизельными двигателями, расходуется на питание вспомогательного оборудования и устройств для обеспечения необходимого уровня комфорта. Сюда относятся питаемые от бортовой системы электроснабжения приборы отопления, компрессоры для систем кондиционирования воздуха и вентиляции, а также вентиляторы и насосы системы охлаждения. Управление питанием этого оборудования в настоящее время осуществляется в ограниченных масштабах. Потребность в энергии и выбор этих устройств определяются, как правило, максимальной мощностью.

Анализ продолжительности работы отдельных единиц оборудования показал, что максимальная мощность в зависимости от времени

года используется только в течение 30–60% времени их работы. Сочетание интеллектуальной системы регулирования и гибридного привода с накопителем энергии открывает совершенно новые возможности для управления работой вспомогательного оборудования:

- питание вспомогательного оборудования энергией, которая поступает от электрического тягового двигателя, работающего при торможении в генераторном режиме, или от накопителя электрической энергии (локальное исключение вредных выбросов);
- использование при пиковых нагрузках энергии, запасенной в накопителе;
- отключение генератора бортовой сети;
- компаундирование (смешанное включение) отдельных единиц вспомогательного оборудования;
- регулирование времени включения в соответствии с режимом движения и уровнем заряда аккумулятора;
- поддержание режима отопления или кондиционирования вагонов в отстое при отключенном дизеле.

Благодаря перечисленным мероприятиям уменьшение выбросов двуоксида углерода и вредных

веществ подвижным составом может достигать 10%.

*Альтернативное топливо.* Как известно, запасы ископаемых энергоносителей, например нефти и угля, ограничены, поэтому необходимо искать альтернативы традиционным энергоресурсам — бензину, дизельному топливу и керосину.

В кратко-, средне- или долгосрочной перспективе прослеживаются две тенденции совершенствования тягового подвижного состава, которые в принципе различаются по философии двигателя. В долгосрочной перспективе отдается предпочтение электрическим двигателям, работа которых не сопровождается вредными выбросами. Наряду с этим возможно применение многочисленных смешанных вариантов, например гибридных систем.

Концепция, реализуемая в кратко- или среднесрочной перспективе, базируется на использовании или совершенствовании двигателей внутреннего сгорания и применении альтернативных видов топлива — биологического, природного газа, водорода. Постепенная замена одного энергоносителя другим должна проводиться с учетом достоинств и недостатков

альтернативного топлива в отношении экономических аспектов его получения и применения.

*Способы снижения вредных выбросов.* Мероприятия по снижению содержания вредных выбросов в выхлопных газах разделяют на относящиеся к конструкции дизеля и не относящиеся к ней.

Изменения, вносимые в конструкцию двигателя, непосредственно влияют на процессы сгорания топлива и образования вредных веществ. Первичные вредные выбросы двигателя можно снизить путем оптимизации способов сжигания, впрыска и обычного наддува. Могут быть также реализованы и нетрадиционные меры, например впрыск смеси топлива с водой (DWE), метод Миллера, а также использование в процессе наддува выхлопных газов (турбонаддув, рис. 6). Здесь выхлопные газы вращают турбину, которая, в свою очередь, приводит в движение компрессор, подающий в цилиндры наддувочный воздух. Все эти меры предусматривают глубокое вмешательство в конструкцию двигателя и могут быть выполнены, как правило, только в рамках модернизации дизелей или создания нового подвижного состава.

Совершенствование способа сжигания топлива в двигателе ведет, как правило, или к его меньшему расходу и, соответственно, меньшим выбросам частиц сажи, или к снижению выбросов окислов азота. Расход топлива в тяговых двигателях — важный критерий, так как он решающим образом влияет на затраты жизненного цикла тягового подвижного состава. Возможности снижения выбросов с помощью этих мероприятий ограничены.

В табл. 4 дан обзор подобных мероприятий, обеспечивающих снижение выбросов окислов азота примерно на 30%.

Исследование представленных в табл. 4 технических мер показало, что целесообразным может быть их

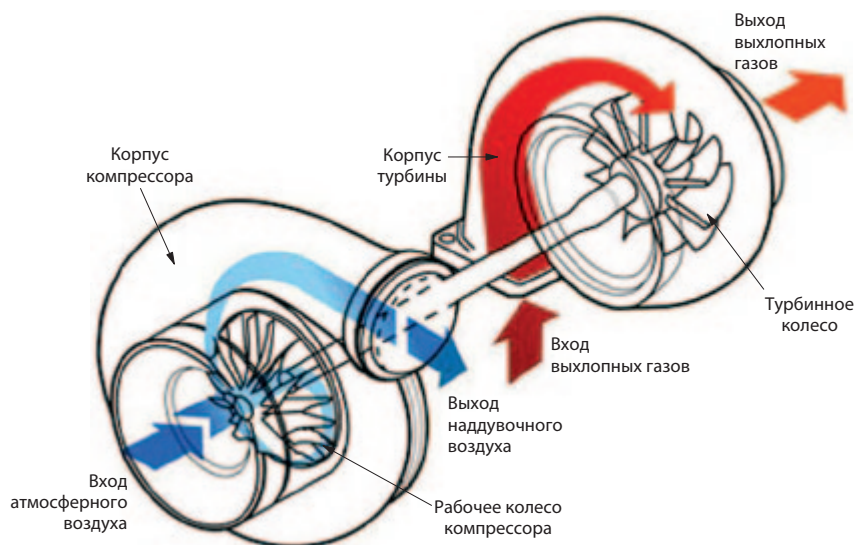


Рис. 6. Схема процесса турбонаддува

сочетание. Совместное использование усовершенствованной технологии впрыска, применение турбонаддува и метода Миллера позволяют добиться значительных улучшений.

Мероприятия, не затрагивающие конструкцию дизеля, предусматривают устранение выбрасываемых вредных веществ либо их преобразование с помощью подключенных фильтров и/или катализаторов. На легковых автомобилях с бензиновыми двигателями такая очистка выхлопных газов производится уже около 20 лет, а на грузовых — с момента вступления в силу документа Euro 4 (октябрь 2005 г.).

На железнодорожном транспорте действуют специальные требования, которые необходимо учитывать при разработке и изготовлении дизелей, а именно:

- значительное снижение выброса вредных веществ (окислов азота, окиси углерода, углеводородов и частиц сажи) при достаточно высокой доле времени работы в режиме холостого хода;

- широкий температурный диапазон работы тягового привода (температура выхлопных газов от 80 до 600 °С);

- устойчивость по отношению к специфическим нагрузкам подвижного состава, прежде всего к частой и быстрой смене температуры выхлопных газов, высоким динамическим силам, возникающим вследствие взаимодействия колеса с рельсом;

- незначительное противодействие выхлопу;

- длительный срок службы и медленное старение приводов;

- отсутствие или лишь незначительное повышение расхода топлива;

- незначительные затраты на ремонт.

Устройства для дополнительной обработки выхлопных газов различаются по принципу действия, сложности, типу применяемого

Таблица 4

## Совершенствование двигателя с целью снижения выбросов окислов азота

Мероприятие	Расход топлива	Монтажный объем	Масса
Система впрыска Common Rail 2-го поколения	Повышен	Без изменений	
Система впрыска Common Rail с турбонаддувом	Повышен незначительно		
Впрыск смеси топлива и воды	Без изменений	+40% объема бака	+ 50% массы топлива
Метод Миллера	Повышен незначительно	Без изменений	

Таблица 5

## Дополнительная обработка выхлопных газов

Вид дополнительной обработки	Принцип действия	Оборудование	Компоненты выхлопных газов
Окисление	Катализ	Катализатор окисления	Углеводороды, окись углерода
Фильтрация	Осаждение	Сажевый фильтр	Частицы сажи
Восстановление	Катализ	Селективная система каталитического осаждения (SCR)	Углеводороды, окислы азота, частицы сажи
Окисление и фильтрация	Катализ и осаждение	Поточный регенерирующий улавливатель (система CRT)	Углеводороды, окислы углерода, частицы сажи
Окисление, восстановление и фильтрация		Система SCRT — сочетание SCR и CRT	Углеводороды, окись углерода, окислы азота, частицы сажи

оборудования, монтажному объему и массе, степени очистки от вредных веществ выхлопных газов дизеля (табл. 5).

Снижение выброса окислов азота и частиц сажи является при этом самым важным требованием. Позднее, после вступления в силу ступени IIIВ директив RL 97/68 EG, запланированного на январь 2012 г., на железнодорожном транспорте будут применяться системы дополнительной обработки выхлопных газов. Для обеспечения установленных предельных значений можно также сочетать мероприятия, выполняемые в конструкции дизеля и вне ее, например одновременно использовать турбонаддув и применять сажевый фильтр.

*Эксплуатационные мероприятия, снижающие вредные выбросы.* Любое уменьшение потребления энергии на железнодорожном

транспорте автоматически ведет к снижению вредных выбросов. Таким образом, экономия энергии на тягу становится средством, позволяющим в краткосрочной перспективе достичь соответствующего успеха в отношении выбросов. Этому способствуют также обучение машинистов, визуализация, регистрация и оценка расхода топлива. Значительный вклад могут внести технические устройства, помогающие машинисту, — так называемые ассистент-системы.

Одна из них, а именно система ESF, обеспечивает энергосберегающий режим ведения поезда. В случае благоприятного положения локомотива в графике движения можно отключить тягу на перегоне и использовать движение поезда на выбеге, т. е. за счет инерции. Это позволяет экономить значительное количество энергии до повторного

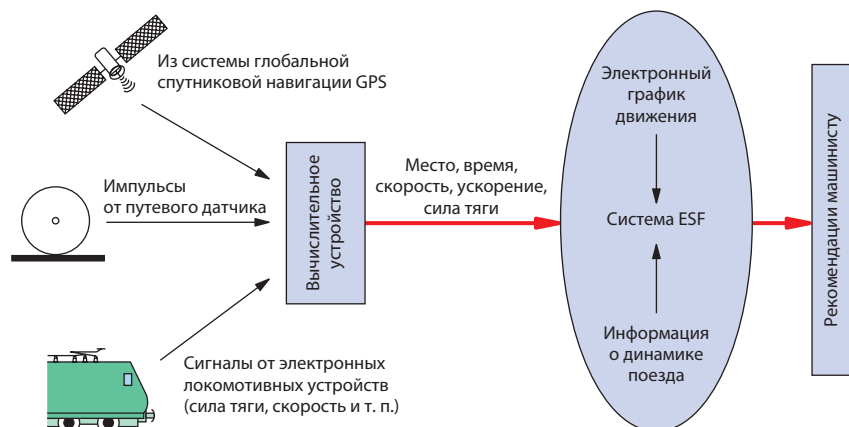


Рис. 7. Принцип действия системы ESF, установленной на локомотиве

включения тяги или до начала процесса торможения без заметного увеличения длительности поездки. Система ESF обеспечивает машиниста информацией о положении поезда в графике и рекомендуемом моменте перехода в режим выбега.

На DB в состав этой системы входит электронное расписание движения поездов (EBuLa). Основным принципом технической реализации системы и необходимые для нее входные данные показаны на рис. 7.

Таким образом, в распоряжении машиниста появилась система-помощник, которая эффективно дополняет его опыт и накопленные практические знания. Она обеспечивает энергооптимальное ведение поезда, быстро реагируя на возникающие нарушения, т. е. своевременно передает машинисту информацию и соответствующие рекомендации.

Еще одним эффективным средством снижения расхода топлива является проект FreeFloat DB, ориентированный на интегральную оптимизацию инфраструктуры, графика движения и методов эксплуатации, а также на гибкий сбыт транспортных услуг. Здесь в центре внимания находятся график движения поездов и эффективность регулирования парка вагонов.

Специальные инструментальные средства DisKon и Zuglaugeflegler обеспечивают оптимальное,

зависящее от условий эксплуатации использование резервов времени в графике, снижают вероятность опоздания поездов и заметно способствуют энергосбережению в процессе движения поезда. На локомотив можно, например, передавать информацию об актуализации графика движения (так называемое регулирование графика), благодаря чему следующие поезда могут быть проведены с меньшей затратой энергии на тягу.

### Итоги и перспективы

В прошедшие годы DB постоянно снижали вредные выбросы, создаваемые тепловозной тягой, реализуя различные технические и эксплуатационные мероприятия. Потенциал снижения вредных выбросов далеко не исчерпан. Вполне возможны дальнейшие улучшения, направленные на защиту климата или повышение конкурентоспособности железных дорог.

Наряду с этим в автомобильных перевозках наблюдается стремление к замене привода автомобиля: промышленность в настоящее время все больше внимания уделяет электрическому приводу.

Большая часть железнодорожных перевозок в течение десятилетий осуществляется на электрической тяге. Вместе с тем полная электрификация федеральной

железнодорожной сети Германии невозможна по соображениям экономической эффективности. Для части промышленных предприятий, а также в путевых работах на железной дороге и в будущем придется использовать тяговый подвижной состав, получающий питание не от контактной сети.

Создание тягового подвижного состава или его отдельных компонентов, обеспечивающих работу без вредных выбросов, является первоочередной задачей железнодорожного машиностроения. При этом следует наряду с прежней установкой на оптимизацию дизелей переходить к рассмотрению общих проблем железнодорожного транспорта, включая влияние на затраты энергоресурсов качества инфраструктуры, в том числе системы тягового электроснабжения.

При совершенствовании подвижного состава промышленность, однако, должна опираться на знания и опыт компаний-операторов. Это может быть особенно полезным при испытаниях технологических систем и компонентов, обеспечивающих повышение энергоэффективности и снижение вредных выбросов, в условиях, близких к эксплуатационным.

DB вместе с ведущими компаниями — изготовителями подвижного состава разработали эффективную концепцию Центра новых технологий приводов и снижения вредных выбросов (DB Eco Center). Его программа базируется на вопросах создания экологичных систем привода для железнодорожного подвижного состава. В состав этого центра вошли такие крупнейшие компании, как Alstom, Bombardier, Siemens.

По материалам института IFEU ([www.ifeu.de](http://www.ifeu.de)) и компании MTU ([www.mtu-online.com](http://www.mtu-online.com)); европейские стандарты по выхлопам дизелей ([www.dieselnet.com](http://www.dieselnet.com)); ZEVrail, 2010, № 3, S. 76–84.