

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ ЗА РУБЕЖОМ ПО МАТЕРИАЛАМ КОНГРЕССА CIMAC 2010

Материал подготовил к.т.н. Г.В. Мельник

Как отмечали многие из выступавших на Конгрессе CIMAC, состоявшемся в июне 2010 г. в Бергене (Норвегия), к безусловным приоритетам современного двигателестроения относятся вопросы экологии. Подчеркивалось, что даже такие важнейшие параметры, как расход топлива и удельная мощность, традиционно ставившиеся во главу угла, отступают в настоящее время на второй план.

В этом обзоре рассматривается опыт снижения вредных выбросов до требуемого уровня таких германских фирм, как «MAN Diesel & Turbo», «MTU Friedrichshafen» и «Caterpillar Motoren GmbH».

В арсенале ведущих производителей присутствуют все известные на сегодняшний день технологии снижения выбросов, включая «внутренние» методы, такие как цикл Миллера, повышение давления впрыска, системы common rail и «внешние» — системы каталитического восстановления (SCR) и рециркуляция отработавших газов (EGR). В обзоре показаны оптимальные области применения той или иной технологии (или их сочетаний), которые будут разными в зависимости от назначения двигателя, и, следовательно, применимых экологических стандартов.

СТРАТЕГИЯ СОЗДАНИЯ МНОГОЦЕЛЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ MAN

Franz Koch, Thomas Seidl, Otto Schnitzer, Georg Oehler, Arnd Loettgen, Stefan Loeser, MAN Diesel & Turbo SE, Германия

Типоразмерный ряд и концепции двигателей

MAN Diesel Group — подразделение, с которого когда-то начиналось создание двигателей Дизеля, является одним из ведущих мировых поставщиков судовых и тепловозных дизелей, а также дизелей для тяжелых грузовиков и дизель-генераторов.

Расширение и углубление НИОКР — необходимое условие поддержания высокого уровня продукции MAN Diesel в настоящем и в будущем. В процессе разработки каждой новой модели интенсивно используется опыт, полученный при разработке двигателей других назначений. При этом продолжается работа над совершенствованием показателей качества двигателей, таких как удельная мощность, надежность, экологическая безопасность и экономичность.

Существует несколько семейств двигателей MAN. В пределах каждого семейства двигатели имеют в принципе одинаковую компоновку, отличаясь между собой, главным образом, размерами деталей. Такой подход позволяет перекрыть одним семейством достаточно большой диапазон

мощности, что, в свою очередь, приводит к существенному снижению общей трудоемкости разработок. Основные расчеты и измерения по большей части применимы ко всем двигателям одного семейства.

Именно этот принцип заложен в основу создания семейства среднеоборотных четырехтактных двигателей MAN. В него входят три типоразмера рядных двигателей: 16/24, 21/31 и 27/38, перекрывающих диапазон номинальных мощностей от 800 до 3000 кВт.

Тесное взаимодействие между разработчиками средне- и высокооборотных дизелей — залог успехов в создании новых и совершенствовании существующих моделей в обоих сегментах. В Аугсбурге (среднеоборотные дизели) накоплен большой опыт в таких областях, как турбокомпрессоры, системы впрыска топлива и электроники, который прекрасно дополняется опытом специалистов из Нюрнберга в развитии высокооборотных экологически безопасных дизелей и в организации крупносерийного производства.

Ниже рассматриваются особенности конструкции и разработки двигателей мощностью от 800 до 3000 кВт.

Как видно из рис. 1, диапазон мощности от 800 до 3000 кВт перекрывает ряд двигателей самых различных применений, в том числе:

- главные двигатели судов с разными профилями нагрузки, например сухогрузы, вспомогательные суда и яхты;
- судовые дизель-генераторы;
- стационарные дизель-генераторы — основные и вспомогательные;

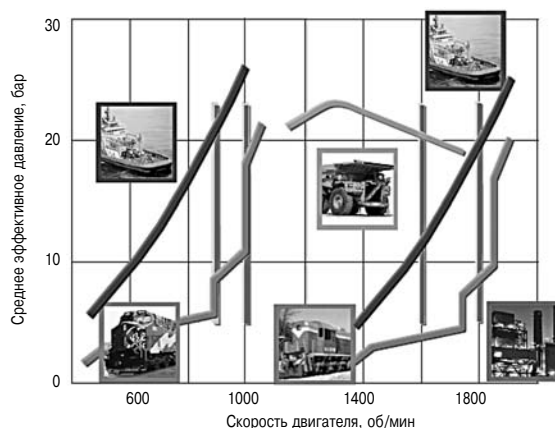


Рис. 1. Различные применения двигателей MAN мощностью от 800 до 3000 кВт

➤ двигатели для внедорожной техники, например подъемные краны и горнодобывающие машины;

➤ промышленные двигатели для бурильных и добывающих установок, морских платформ, судов снабжения;

➤ тепловозы и путевые машины.

Ожидаемые ограничения выбросов

Современные среднеоборотные судовые двигатели должны обеспечивать те же показатели по расходам топлива, выбросам и производственным затратам, что и транспортные двигатели для внедорожной техники.

В ближайшие годы для этих двигателей вводятся более жесткие экологические требования. На рис. 2 показаны нормативы IMO Tier 1–3 по выбросам NO_x для судовых дизелей.

Динамика снижения выбросов для автомобильных, промышленных и судовых дизелей за последние несколько лет показана на рис. 3. Производители автомобильных двигателей вынуждены быстрее остальных приспособляться к постоянно ужесточающимся нормативам вредных выбросов. С 2008 г. действуют нормы EURO 5 ($\text{NO}_x < 2 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$, $\text{PM} \leq 0,020 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$). Обширный опыт улучшения экологических показателей, накопленный в ходе разработки автомобильных

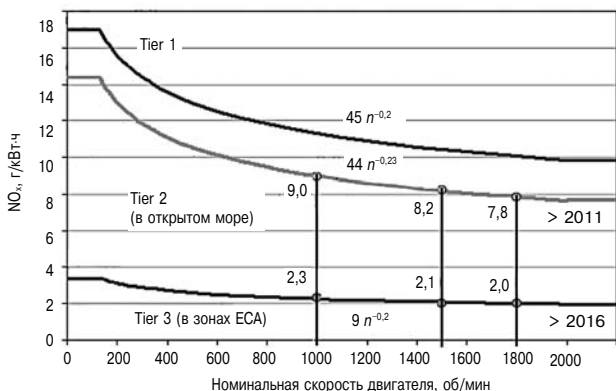


Рис. 2. Предельно допустимые выбросы NO_x для судовых дизелей

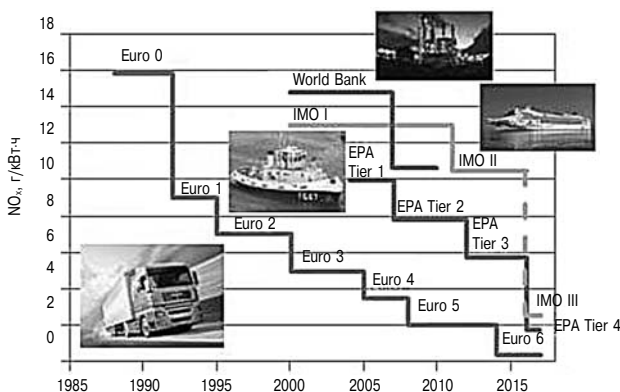


Рис. 3. Сравнение допустимых выбросов для автомобильных, главных судовых дизелей и дизель-генераторов

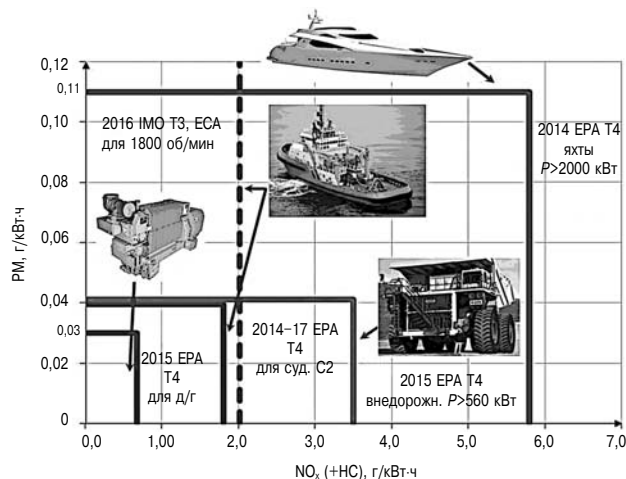


Рис. 4. Норма выбросов NO_x и частиц (2016 г.) для дизелей мощностью 800–3000 кВт

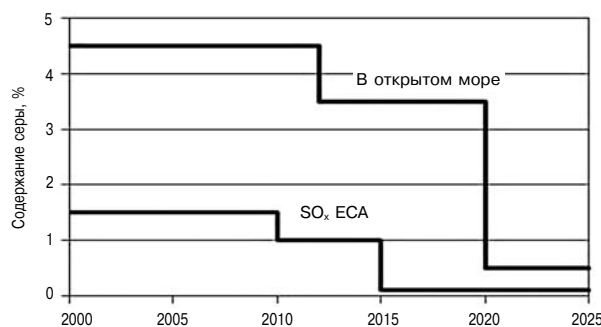


Рис. 5. Динамика снижения содержания серы в топливе (IMO)

двигателей, с успехом может быть использован при создании дизелей большей размерности для стационарных и судовых установок.

Несмотря на попытки гармонизации законодательства ЕС и США, нормативы выбросов все еще сильно различаются в зависимости от конкретных применений двигателей. На рис. 4 показаны предельные значения выбросов NO_x и частиц, вступающие в силу в ЕС и США в 2016 г.

Выбор метода снижения выбросов NO_x зависит от характера используемого топлива, в первую очередь — от содержания в нем серы. Динамика снижения содержания серы в топливе для судовых дизелей показана на рис. 5.

Рост цен на топливо и то внимание, которое последнее время уделяется выбросам CO_2 , привели к тому, что двигателестроители вновь сосредоточили основные усилия на дальнейшем повышении топливной экономичности.

Конструктивные особенности

Двигатели мощностью 800–3000 кВт применяются во множестве установок самого различного назначения. Главным требованием для них оказывается высочайший уровень надежности. Не менее важно увеличить интервалы между техобслуживанием и ремонтом, что опять-таки зависит от надежности машины.

Диапазон мощностей, о котором идет речь, характерен для двигателей двух основных категорий. Это, с одной стороны, автомобильные дизели, для которых характерна большая серийность и небольшое число модификаций, с другой стороны, — это среднеоборотные судовые двигатели, малой серийности с большим числом модификаций.

Подходы к техническому обслуживанию автомобильных и судовых двигателей принципиально различны. Крупные двигатели в силу своего веса не могут быть сняты для ремонта с корабля или с электростанции, поэтому все работы по ремонту и техобслуживанию таких двигателей проводятся на месте установки в течение всего срока их службы. Например, срок службы картера должен составлять не менее 100 000 ч. Напротив, снятие двигателя с автомобиля проблемы не представляет, поэтому такие двигатели, как правило, заменяются и проходят ремонт на специализированных предприятиях.

При использовании различных конструктивных концепций для получения одинаковой мощности в зависимости от применения двигателя возникает вопрос о том, как это отражается на основных конструктивных решениях. Характер применения двигателя определяет вид топлива, частоту вращения и массогабаритные показатели.

Как правило, высокооборотные двигатели работают только на дизельном топливе, тогда как среднеоборотные двигатели — на тяжелом. Более медленное протекание процесса сгорания в среднеоборотных двигателях диктует необходимость использования в них большего хода поршня. На рис. 6 показано типичное распределение S/D для двигателей MAN.

Двигатели, используемые для привода генераторов переменного тока, должны иметь частоту вращения, соответствующую частоте тока 50 или 60 Гц. Для частоты 60 Гц значения частоты вращения составляют 600, 720, 900, 1200 и 1800 об/мин, а для 50 Гц — 600, 750, 1000 и 1500 об/мин.

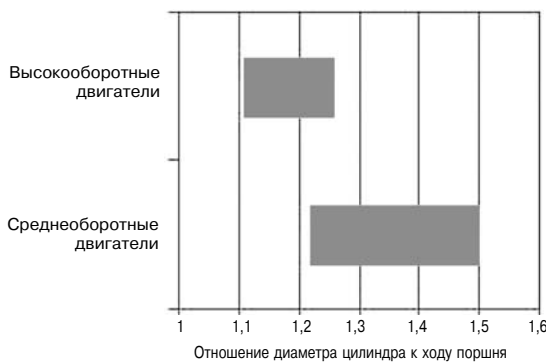


Рис. 6. Отношение хода поршня к диаметру цилиндра в высоко- и среднеоборотных двигателях

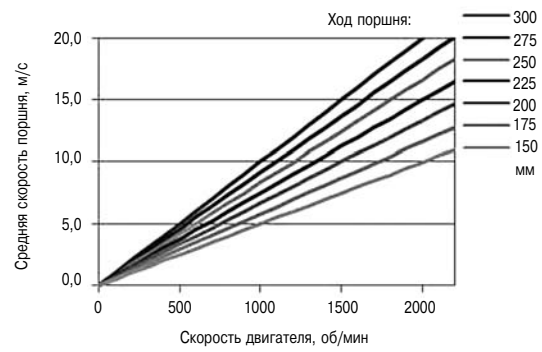


Рис. 7. Средняя скорость поршня в функции скорости двигателя и хода поршня

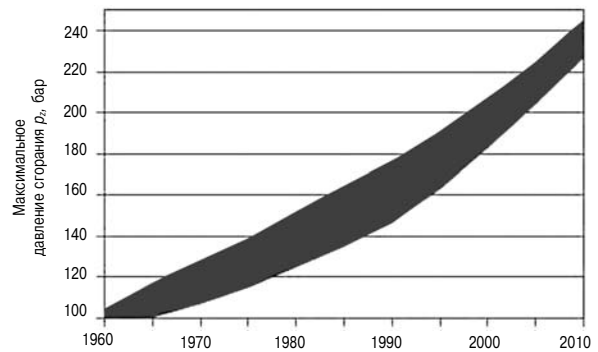


Рис. 8. Максимальное давление в цилиндре

Соотношение частоты вращения двигателя и средней скорости поршня показано на рис. 7. Средняя скорость поршня оказывает существенное влияние на инерционные силы, возникающие в кривошипно-шатунном механизме, а также на износ поршня, втулки цилиндра и поршневых колец. Для современных конструкций отмечен рост средней скорости поршня как для средне-, так и для высокооборотных дизелей. Впрочем, возрастают не только силы инерции, но и силы давления газов. Максимальное давление в цилиндре увеличилось до 220–250 бар (рис. 8).



Рис. 9. Результат расчета картера

На рис. 9 в упрощенном виде показано поперечное сечение цилиндра среднеоборотного двигателя, по конструкции аналогичного предыдущей модели. Подобная аналогия позволила значительно упростить работу с моделью и уменьшить число узлов, причем изменения конструкции автоматически транслируются в расчетную модель.

Обычно расчет ведется для следующих трех видов нагрузки: предварительное напряжение, инерционная нагрузка и нагрузка от давления газов. Для каждого из указанных видов нагружения по отдельности анализируются области наибольших напряжений.

Проектирование и расчет деталей двигателя

Картер — один из главных компонентов двигателя, оказывающий существенное влияние на его основные массогабаритные показатели. Кроме того, именно конструкция картера главным образом определяет вибрационные характеристики двигателя и его надежность. Вот почему разработчики всегда стремятся создать максимально жесткий картер с минимальной массой. На всех этапах проектирование ведется с использованием специального аттестованного программного обеспечения.

Одной из целей оптимизации является разработка единой платформы, чтобы свести к минимуму количество вариантов компонентов двигателя и тем самым минимизировать себестоимость его изготовления.

Обычно общими компонентами для такой платформы являются:

- блок цилиндров;
- коленвал и подшипники;
- шатуны;
- головка и втулка цилиндра;
- привод кулачкового вала;
- система топливоподачи;
- семейство турбокомпрессоров.

Также существуют группы компонентов, общие для отдельных применений, имеющие варианты исполнения, в том числе:

- поршень;
- демпфер;
- кулачковый вал;
- теплообменники и фильтры;
- системы управления и контроля;
- воздушная система, включающая входной ресивер и выпускной коллектор;
- масляные и водяные насосы;
- поддон;
- турбокомпрессор определенного типа.

Остальные компоненты зависят от конкретных применений. К их числу относятся:

- система подачи топлива (дизельного, тяжелого или газового);

- насосы для гидроусилителей;
- электроприводы;
- крепеж;
- устройства отбора мощности;
- воздушный компрессор.

Основные виды специализации

Для успешного создания новых двигателей различного применения требуется углубленная специализация в таких областях, как электроника, системы впрыска топлива и турбонаддува (рис. 10).

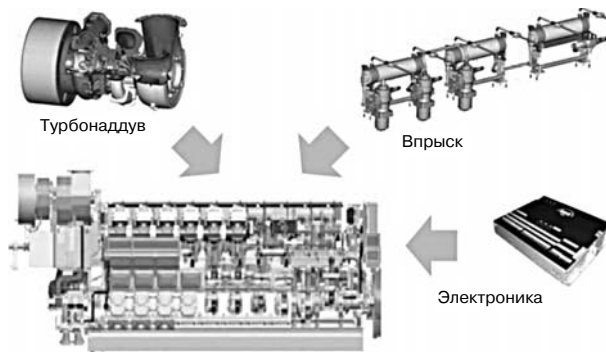


Рис. 10. Основные виды специализации

Перечисленные выше направления являются ключевыми для современного двигателестроения. В ближайшем будущем возникнет необходимость специализации в области экологической защиты. Специализированные поставщики систем экологической защиты должны будут взять на вооружение все имеющиеся технологии.

Решающее влияние на расход топлива и вредные выбросы оказывает система впрыска. Чтобы оставаться на мировом уровне по таким показателям, как расход топлива, выбросы NO_x и сажи, необходимо поднимать давление впрыска топлива. Динамика роста давления впрыска топлива показана на рис. 11. Резкий скачок этого показателя для автомобильных двигателей после 2000 г. связан с вводом в действие новых, более жестких экологических нормативов.

Динамика роста КПД турбокомпрессоров за последние годы показана на рис. 12. Влияние этого параметра на такие характеристики двигателя, как

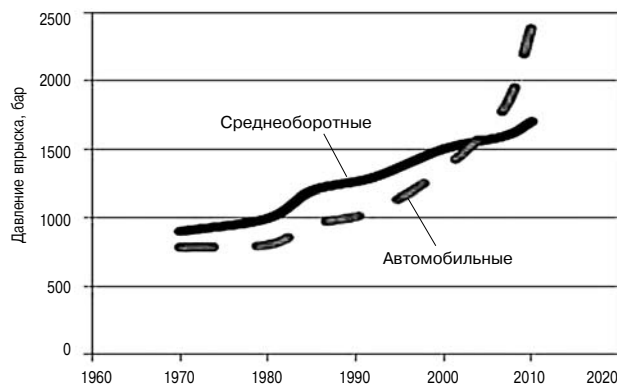


Рис. 11. Динамика изменения давления впрыска

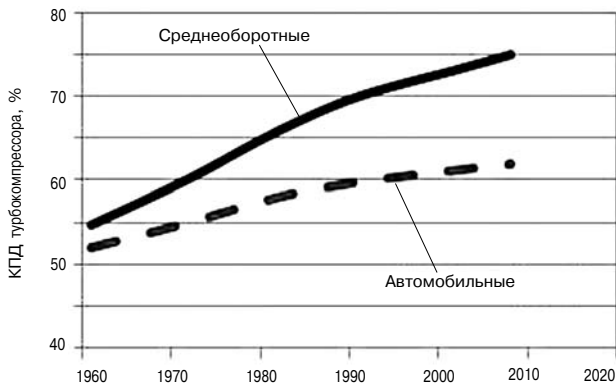


Рис. 12. Динамика изменения КПД турбокомпрессора

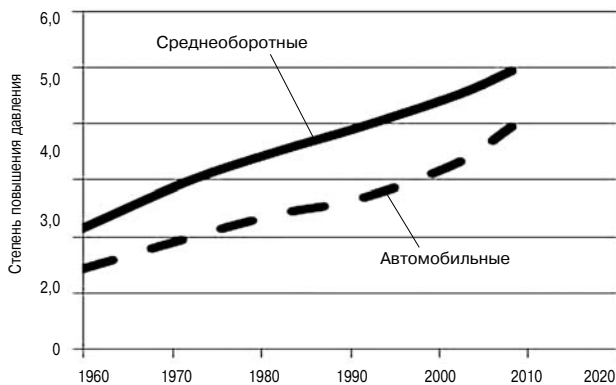


Рис. 13. Динамика изменения степени повышения давления

расход топлива и показатели вредных выбросов трудно переоценить. Вот почему он должен быть всегда на самом высоком уровне.

Еще один характерный параметр, величина которого отличается у автомобильных и среднеоборотных двигателей, — это степень повышения давления в турбокомпрессорах. Как видно из рис. 13, этот показатель и для автомобильных и для среднеоборотных двигателей значительно вырос, при этом у последних он выше примерно на единицу.

Разработка и производство

В ходе разработки приходится принимать во внимание целый ряд факторов, таких как вес и габариты двигателя, его способность работать в тяжелых условиях, а также адаптируемость к различным видам топлива, учитывая перспективы лицензионного производства двигателей в разных регионах мира.

Для полного учета всех исходных условий и взаимосвязей фирмой MAN был разработан и внедрен формализованный и прозрачный алгоритм создания двигателя (рис. 14), успешно использованный в целом ряде проектов. Ключевой фактор этого алгоритма состоит в интенсивном и всестороннем моделировании на всех этапах проектирования. При этом необходимым условием экономии рабочего времени и снижения затрат



Рис. 14. Алгоритм создания двигателя совместно с лицензиатами

является использование опыта проектирования каждого конкретного двигателя при создании всех других версий. Такая возможность обеспечивается интегрированной структурой 3D-данных для всей программы судовых дизелей. При этом чрезвычайно важно использовать накопленный фирмой опыт в таких областях, как системы турбонаддува, впрыска топлива и управления. Несмотря на различия в методах испытаний и верификации моделей, процесс разработки высоко- и среднеоборотных двигателей принципиально один и тот же.

Методы снижения вредных выбросов

Фирмой MAN Diesel рассматриваются следующие методы снижения вредных выбросов.

➤ Внутренние:

- повышение максимального давления сгорания;
- повышение давления впрыска;
- множественный впрыск;
- оптимизация камеры сгорания, положения форсунки;
- рециркуляция отработавших газов;
- оптимизация турбонаддува;
- снижение механических потерь в двигателе;
- снижение расхода топлива.

➤ Внешние:

- использование фильтра частиц;
- использование системы SCR на основе мочевины.

Общей особенностью всех вновь проектируемых экологически безопасных двигателей является все более интенсивное использование систем автоматики и управления, а также растущее количество разнообразных датчиков для управления и самодиагностики.

Заключение

Для развития своей дизельной программы MAN Diesel выбрал направления создания высоко- и среднеоборотных стационарных и судовых двигателей.

Процесс взаимообогащения обеих программ включает взаимное использование технологий, оптимизацию производства, структуры поставок и методов проектирования, результатом чего является повышение технико-экономических показателей всей номенклатуры двигателей.

Расширение и углубление НИОКР является необходимым условием поддержания высокого уровня продукции MAN Diesel в настоящем и в будущем.

MAN Diesel непрерывно работает над совершенствованием своих изделий и улучшением таких важнейших показателей, как мощность, надежность и экологическая безопасность двигателей.

ЗА СЧЕТ ЧЕГО ФИРМА MTU НАМЕРЕНА ВЫПОЛНЯТЬ ТРЕБОВАНИЯ БУДУЩЕГО ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВА

Ulrich Dohle, Tognum AG, Германия

Учитывая постоянное ужесточение экологического законодательства во всем мире, содержание вредных выбросов в отработавших газах двигателей внедорожных машин привлекает к себе все более пристальное внимание общественности. Это обстоятельство побуждает законодателей к дальнейшему ужесточению экологических требований для крупных двигателей. Подобные двигатели используются в разнообразных внедорожных машинах, работающих в самых различных условиях. Поэтому MTU Friedrichshafen старается предложить оптимальное решение для каждого конкретного применения и для каждого заказчика. В настоящем докладе подробно рассматриваются технологии снижения выбросов, оптимальные для судовых и тепловозных двигателей, а также для дизель-генераторов.

Действующие нормативы вредных выбросов для судовых и тепловозных дизелей и дизель-генераторов

Нормирование выбросов для судовых дизелей началось в 2000 г. с введения ограничений на выбросы окислов азота (IMO Tier 1), а в 2008 г. были приняты нормы для последующих этапов (Tier 2 — с 2011 г., и Tier 3 — с 2016 г.). Согласно IMO выбросы NO_x в абсолютном выражении нормируются в зависимости от номинальной скорости дизеля таким образом, чтобы при этом можно было учесть технические возможности дизелей различных размеров. Норма выбросов IMO Tier 3 — вводится в так называемых «зонах ограниченных выбросов» (ECA — emission control areas). В этих зонах предусмотрено снижение выбросов NO_x на 80 % по сравнению с IMO Tier 1.

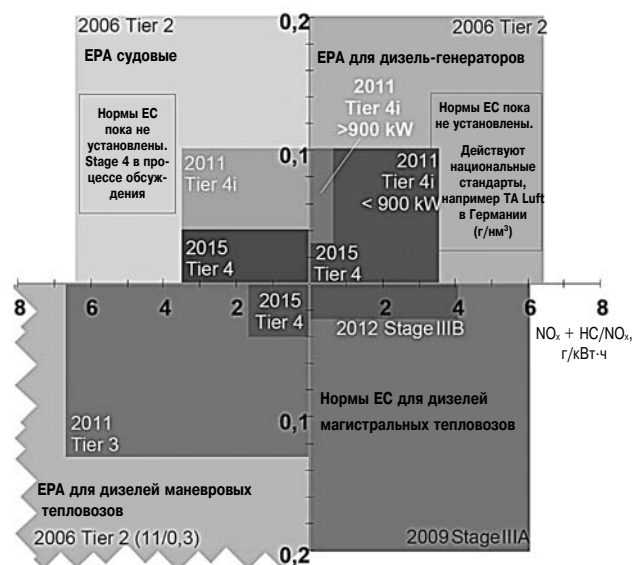


Рис. 1. Предельно допустимые выбросы окислов азота и частиц для внедорожных машин (с двигателями мощностью свыше 560 кВт) в Европе и в США

В них также ограничены выбросы двуокиси серы, что требует применения малосернистого топлива (с содержанием серы <1000 ppm). Применение мазута с высоким содержанием серы возможно при наличии системы очистки отработавших газов от SO_2 . Норма EPA Tier 4 (США) по NO_x составляет 1,8 г/кВт·ч, что очень близко к нормативу IMO Tier 3. Содержание частиц не должно превышать 0,04 г/кВт·ч. Требования для наземных внедорожных установок мощностью более 560 кВт, начиная с 2015 г., также существенно ужесточаются (рис. 1).

Определяющим фактором при выборе того или иного технического решения является его способность снизить одновременно выбросы твердых частиц и NO_x . В большинстве случаев новые требования вводятся в два этапа. Однако в зависимости от применения двигателя эти этапы существенно разнятся.

Для тепловозных двигателей в Европе с 2012 г. на этапе EU Stage 3B устанавливается предел суммарного содержания $\text{NO}_x + \text{HC}$, равный 4,0 г/кВт·ч. Эмиссия частиц на этом этапе составляет 0,025 г/кВт·ч. В США для тепловозных двигателей норматив Rail Tier 3 с 2011 г. устанавливает выбросы NO_x на уровне 7,4 г/кВт·ч для магистральных тепловозов, и 6,7 г/кВт·ч — для маневровых тепловозов. Эмиссия частиц составляет 0,13 г/кВт·ч. Rail Tier 4 (вводится с 2015 г.) предусматривает дальнейшее ужесточение требований. Эмиссия частиц будет снижена до 0,04 г/кВт·ч, а NO_x — до 1,8 г/кВт·ч.

Для дизель-генераторов в Европе действуют различные нормативы. В Германии — это правила поддержания чистоты воздушного бассейна TA

Luft. В США на двигатели генераторов мощностью более 900 кВт с 2011 г. распространяется чрезвычайно жесткая норма NO_x — 0,67 г/кВт·ч.

На втором этапе предусмотрено дальнейшее снижение выбросов частиц (в США от 0,1 до 0,03 кВт·ч). Исключение составляют аварийные дизель-генераторы, где продолжают действовать требования ЕРА Tier 2.

Методы снижения выбросов

Технически наибольшую сложность представляет одновременное снижение выбросов окислов азота и частиц. С остальными токсичными компонентами справиться легче. Уменьшение окислов серы в быстроходных дизелях достигается использованием малосернистых топлив. Другие методы относятся, в основном, к двигателям, работающим на мазуте, и в данном случае не актуальны.

Методы снижения выбросов окислов азота и частиц делятся на внутренние и внешние.

В первую группу входят изменение фаз газораспределения (цикл Миллера) и рециркуляция отработавших газов. Существует еще ряд методов, которые пока находятся на стадии экспериментов, и поэтому не могут учитываться при разработке нормативов. В качестве примеров можно привести использование водотопливной эмульсии и гомогенизацию рабочей смеси.

Эффективность внутренних методов может быть достаточно высокой, но она, как правило, достигается за счет усложнения систем управления. Выбор технологии определяется заданными целевыми показателями и другими требованиями к конструкции двигателя. Во многих случаях очевидна необходимость использования систем очистки отработавших газов, в частности систем каталитического восстановления NO_x (SCR) совместно с фильтрами частиц (для снижения РМ).

В большинстве случаев для достижения уровня IMO Tier 2 (для судовых двигателей) достаточно использовать внутренние средства, например цикл Миллера. Для снижения дымности необходимо также повышать давление впрыска и наддува. Хотя выброс частиц для судовых двигателей законодательно не регламентируется, наличие видимого дыма обычно не допускается. Для достижения уровня IMO Tier 3 внутренние средства должны быть дополнены SCR.

Выбор методов снижения выбросов зависит от ряда факторов, в том числе таких, как:

- наличие в портах захода реагента для SCR-процесса (мочевины);
- наличие и цена малосернистых топлив;
- удельная мощность двигателя;
- необходимость переключения между режимами IMO Tier 2 и IMO Tier 3.

Для достижения IMO Tier 3, с учетом разнообразия условий и видов применения, по-видимому, потребуются обе системы одновременно.

С 2011 г. MTU обеспечивает уровень ЕРА Tier 4i по NO_x в транспортных двигателях мощностью свыше 560 кВт внутренними средствами в сочетании с рециркуляцией отработавших газов (кроме дизель-генераторов). Для тепловозных двигателей, от которых требуется достижение уровня EU Stage 3В по NO_x , использование SCR не планируется.

Для дизель-генераторов мощностью свыше 900 кВт эмиссия NO_x должна быть меньше 0,67 г/кВт·ч, что может быть достигнуто лишь с помощью интенсивной рециркуляции отработавших газов при очень низкой температуре воздушного заряда (низкотемпературная рециркуляция). Данная технология пока не достигла уровня, необходимого для серийного применения. Поэтому в данном случае выбирается технология SCR.

Современные методы организации рабочего процесса в сочетании с высоким давлением впрыска топлива обеспечивают резкое снижение выброса частиц даже при наличии рециркуляции. Тем не менее, для обеспечения надежного снижения выброса частиц на уровне 0,025 г/кВт·ч фильтры частиц, по-видимому, придется сохранить.

Критерии выбора оптимальных методов весьма многочисленны и разнообразны. Перечислим важнейшие из них:

- располагаемое пространство;
- возможная глубина охлаждения воздуха на впуске;
- инфраструктура снабжения мочевиной;
- производственные затраты;
- эксплуатационные затраты;
- выбросы CO_2 (топливная экономичность).

Приоритеты в выборе указанных критериев могут сильно отличаться в зависимости от конкретного применения, поэтому выработать единую концепцию оптимизации для всех возможных применений промышленных двигателей практически невозможно.

Примеры реализации

Анализ нормативов на 2011/2012 гг. показывает, что все действующие ограничения для выбросов частиц, за исключением нормы EU Stage 3В для тепловозных двигателей, составляющей 0,025 г/кВт·ч, находятся в довольно узком диапазоне — от 0,10 до 0,12 г/кВт·ч, тогда как выбросы окислов азота варьируются от 0,67 до почти 8 г/кВт·ч. Именно этим объясняется столь большое разнообразие возможных методов снижения NO_x . В каждом случае определяющим фактором при выборе технологической концепции

является необходимость соблюдения норм выбросов NO_x .

На рис. 2 показаны возможные области применения методов снижения NO_x , таких как цикл Миллера, рециркуляция отработавших газов (EGR) или SCR в зависимости от задаваемых ограничений по NO_x . Теоретически каждый из этих методов может быть применен и за пределами указанных областей, однако технически это нецелесообразно.

Другим определяющим фактором при выборе метода нормализации выбросов является оценка конструктивного усложнения, необходимого для его реализации, например, повышения давления наддува, давления впрыска или максимального давления сгорания. На рис. 3 приведены изменения давления наддува и максимального давления сгорания, связанные с применением тех или иных методов. При этом предполагается, что остальные параметры двигателя, такие как мощность, расход воздуха и степень сжатия, являются постоянными, а углы начала и конца впрыска оптимизированы по расходу топлива.

Преимущество технологии SCR состоит в том, что необходимое снижение NO_x может быть достигнуто без существенного увеличения максимального давления сгорания и давления наддува. Реализация цикла Миллера и EGR связана с более серьезными конструктивными усложнениями. Они тем серьезнее, чем меньше норма выбросов NO_x . При рассмотрении указанных методов применительно к существующей конструкции двигателя неизбежно возникает вопрос о том, могут ли они быть применены без радикальных изменений базовой конструкции, связанных с системой турбонаддува или топливной системой.

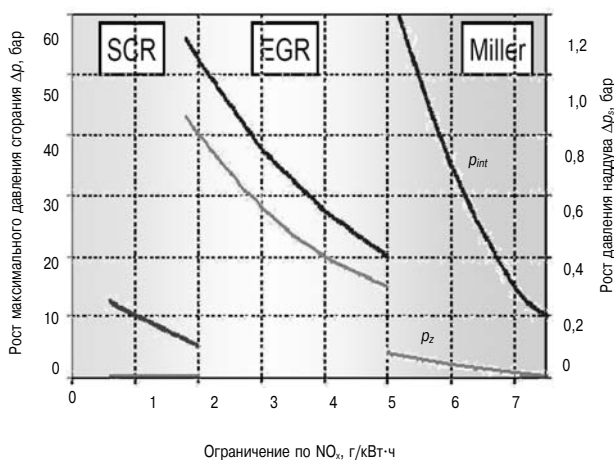


Рис. 2. Сравнение методов снижения выбросов по потенциалу снижения NO_x и соответствующему усложнению конструкции двигателя: SCR, EGR, Miller (цикл Миллера)

Судовые двигатели

Серия судовых двигателей 4000 «Ironmen» для работы на винт и для привода генераторов производится серийно с 2009 г. Эти дизели отличаются исключительной надежностью, прочностью и низкими затратами полного срока эксплуатации. Требования действующих на данный момент стандартов EPA Tier 2 (США) и IMO Tier 2 могут быть выполнены исключительно внутренними средствами, без использования рециркуляции отработавших газов.

Что касается следующей стадии, то здесь существует определенный выбор возможных методов. Цель состоит в том, чтобы уложиться во все будущие нормативы (включая EPA Tier 4) не прибегая к очистке отработавших газов от частиц. Это позволит значительно уменьшить сложность системы, ее начальную стоимость и занимаемое ею место. Однако для определенных применений по требованию заказчика возможен вариант с использованием фильтра частиц. Ключевым компонентом всех «внутренних» методов снижения выброса частиц является новая система впрыска топлива, разработанная фирмой L'Orange (входящей в группу Tognum). Максимальное давление впрыска в ней увеличено по сравнению с серийно выпускаемой.

Для снижения выбросов NO_x (рис. 3) возможно применение цикла Миллера или EGR для достижения уровня EPA Tier 3 (и IMO Tier 2), и SCR или EGR для достижения уровня EPA Tier 4 (и IMO Tier 3 ECA). Норма выбросов частиц может быть достигнута за счет увеличения давления впрыска топлива в сочетании с совершенствованием процесса сгорания.

Для выработки единой стратегии развития и сокращения объема разработок было необходимо

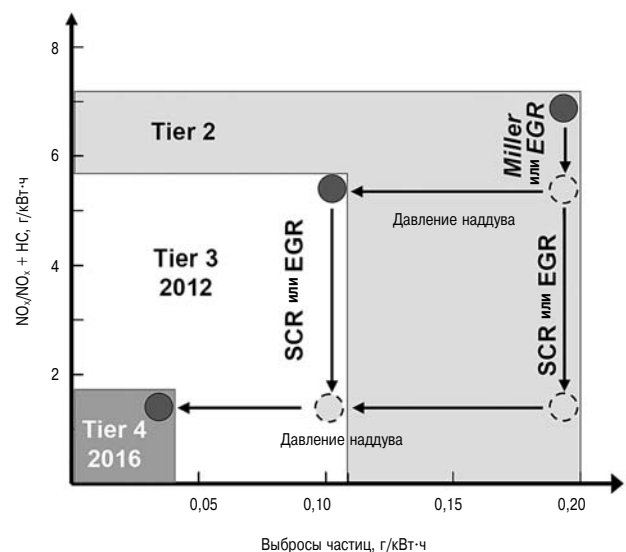


Рис. 3. Методы достижения требований EPA Tier 3 и Tier 4

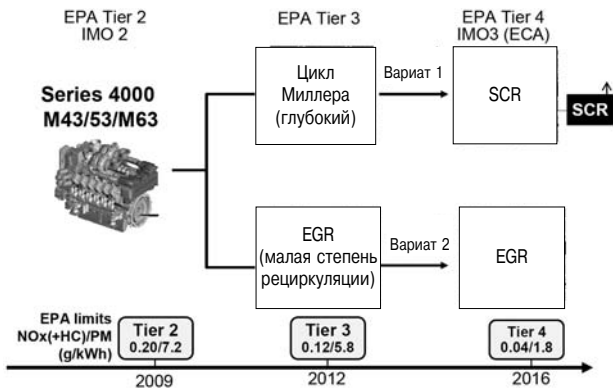


Рис. 4. Возможные методы достижения соответствия требованиям перспективных экологических нормативов для судовых двигателей

скоординировать концепции выполнения нормативов EPA Tier 3 (2012) и EPA Tier 4 / IMO Tier 3 ECA (2016). Здесь возможны два пути дальнейшего развития (рис. 4).

Вариант 1 требует менее радикальных изменений конструкции для достижения IMO Tier 2. Необходимое изменение газораспределения по Миллеру в этом смысле более требовательно к ресурсам, поскольку требует значительного повышения давления наддува во избежание роста расхода топлива; выбросы NO_x при этом снижаются примерно на 20%. Новый высокоэффективный турбокомпрессор MTU позволяет достичь этого без использования сложной двухступенчатой системы наддува. Начиная с 2016 г., данный двигатель может быть дополнен системой SCR. Поскольку IMO Tier 3 на сегодняшний день устанавливает столь низкие нормы по NO_x только для зон регулируемых выбросов (ECA), за пределами этих зон, вероятно, будет возможна работа без впрыска мочевины.

Альтернативой SCR является снижение выбросов NO_x внутренними средствами путем рециркуляции отработавших газов с охлаждением (вариант 2). Наибольшую проблему здесь представляет коррозионное и абразивное воздействие отработавших газов на двигатель. При этом надежная работа дизеля должна быть гарантирована во всем диапазоне рабочих параметров в течение межремонтного срока, равного 30 000 ч. По сравнению с SCR вариант EGR является более легким и компактным, а также позволяет обходиться без дополнительного реагента (мочевины).

Для окончательного выбора рабочего варианта потребуются дальнейшие интенсивные исследования с учетом потребностей отдельных заказчиков.

Тепловозные двигатели

С 1997 г. на тепловозах успешно применяются двигатели MTU серии 4000. Выпуск новейшей версии этой серии, удовлетворяющей нормам EU

Stage 3B, запланирован на 2012 г. Учитывая высокие требования заказчиков, в том числе по расходу топлива, надежности, ремонтпригодности и занимаемого места, разработчикам сразу стало очевидно, что эти требования могут быть удовлетворены только с помощью следующей конфигурации: система рециркуляции отработавших газов с охлаждением, двухступенчатый турбонаддув и фильтр частиц.

Ключевым элементом новой технологии снижения выбросов NO_x без SCR является запатентованная система MTU с использованием цилиндров-доноров. Она обеспечивает высокую степень рециркуляции даже в случае превышения давления на всасывании относительно давления выпуска. С помощью двух регулирующих клапанов достигается оптимальная степень рециркуляции в каждой точке рабочей характеристики двигателя (рис. 5).

Для поддержания расхода топлива на минимально возможном уровне используется умеренный цикл Миллера. Регулируемый двухступенчатый наддув (с управляемым обводом турбины высокого давления) обеспечивает необходимый воздушный заряд при любых значениях рабочих параметров и высокие динамические характеристики. Весьма удачным с точки зрения унификации оказалось использование двух турбокомпрессоров низкого давления и одного турбокомпрессора высокого давления, имеющего те же размеры. Система впрыска common rail типа LEAD2 обеспечивает более высокое (по сравнению с двигателями EU Stage 3A) давление впрыска за счет более тонкого распыливания топлива (рис. 6).

В модернизированном двигателе используется также новая система фильтрации частиц. При ее создании ставилась задача выйти на новый уровень функциональности и безопасности, а также

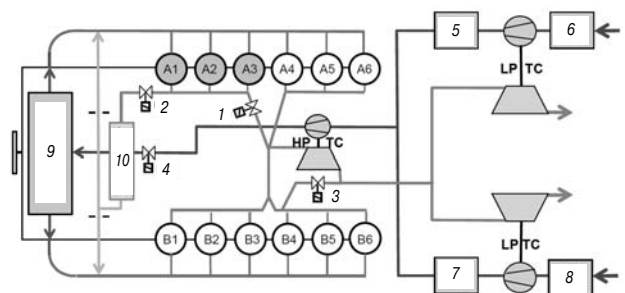


Рис. 5. Схема системы EGR с цилиндрами-донорами (A1-A3) и регулируемым двухступенчатым наддувом: 1 — управление EUR между цилиндрами; 2 — управление EGR между охладителем и цилиндрами; 3 — регулируемый байпас ТВД; 4 — воздушная заслонка (терморегулятора); 5 — воздухоохладитель низкого давления; 6, 8 — воздушный фильтр; 7 — воздухоохладитель низкого давления; 9 — воздухоохладитель высокого давления; 10 — воздухоохладитель EGR

минимизации расхода топлива на любом режиме. Для большинства применений используется система пассивной регенерации, включающая катализатор сжигания дизтоплива (DOC) и фильтр твердых частиц (DPF) с каталитическим покрытием. Использование эффекта CRT (continuous regeneration trap — сажевый фильтр с постоянной регенерацией) позволяет отказаться от применения активного регенератора.

Интеллектуальная система терморегулирования обеспечивает поддержание температуры, достаточной для пассивной регенерации фильтра во всем диапазоне рабочих режимов. На рис. 7 показаны графики изменения нагрузки на фильтр твердых частиц и его температуры, полученные в результате моделирования работы системы. Несмотря на то что двигатель маневрового тепловоза большую часть времени работает на холостом ходу, для достижения точки равновесия для фильтра (т. е. момента, начиная с которого рост отложений сажи на фильтре прекращается), всего лишь нескольких часов работы оказывается достаточно.

В настоящее время опытный образец нового двигателя проходит интенсивные стендовые ис-

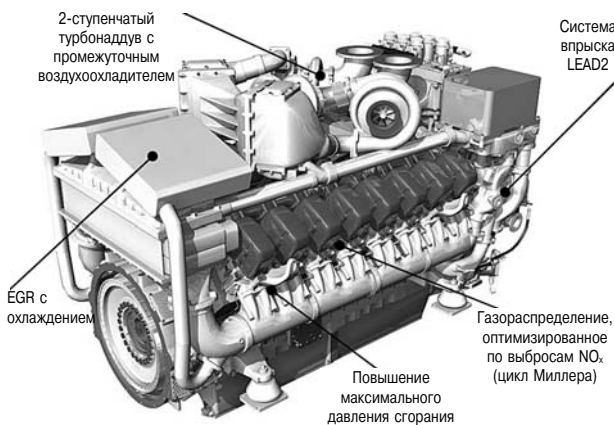


Рис. 6. «Внутренние» методы достижения уровня требований EU ПИВ для тепловозных двигателей MTU

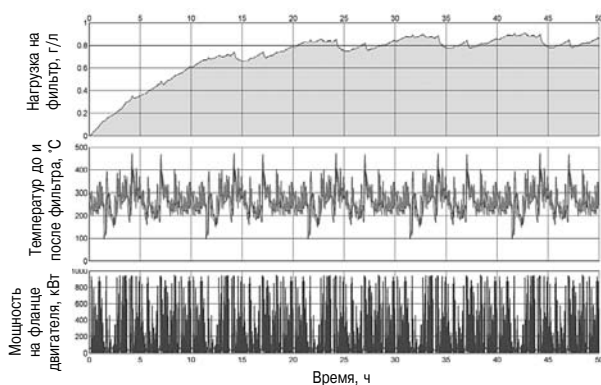


Рис. 7. Результаты моделирования нагрузки на фильтр и изменения температуры фильтра для типичного рабочего цикла маневрового тепловоза

пытания. В 2011 г. опытные образцы нового двигателя установлены на нескольких тепловозах, где они будут проходить обкатку до начала серийного производства, намеченного на 2012 г.

Двигатели для дизель-генераторов

Использование SCR в двигателе, предназначенном для привода генераторов, неизбежно, учитывая, что норма выброса NO_x составляет 0,67 г/кВт·ч (при номинальной мощности двигателя более 900 кВт). Эмиссия частиц, равная 0,1 г/кВт·ч, может быть обеспечена за счет внутренних средств, т. е. оптимизации процессов сгорания и впрыска топлива.

Дополнительные конкурентные преимущества приносит минимизация затрат на полный срок эксплуатации. Значимость этого фактора возрастает по мере увеличения годовой наработки двигателя и коэффициента использования мощности.

Затраты на полный срок эксплуатации дизель-генератора определяются, в первую очередь, расходами на топливо. Кроме того, для будущих агрегатов Tier 4i (промежуточный уровень EPA Tier 4) придется учитывать стоимость мочевины. На рис. 8 показаны совокупные затраты на дизельное топливо и водный раствор мочевины в зависимости от содержания окислов азота. Очевидно, что при исходном содержании в отработавших газах NO_x, превышающем примерно 7 г/кВт·ч, затраты полного срока эксплуатации сокращаться не будут, поскольку стоимость мочевины при этом будет пропорционально расти. При высокой концентрации NO_x потребуются SCR со степенью преобразования больше 90%. Более того, ожидаемая экономия на топливе в этом диапазоне может быть достигнута только при условии дальнейшей подстройки угла опережения впрыска, ведущей к повышению давления впрыска.

С учетом всех обстоятельств, уровень содержания NO_x после двигателя, оптимальный для

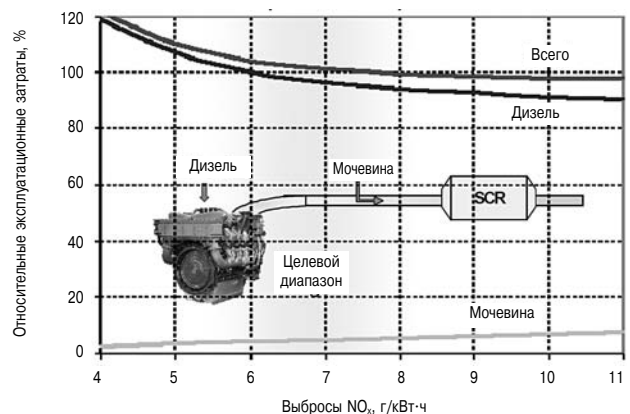


Рис. 8. Зависимость эксплуатационных затрат от содержания NO_x в неочищенных отработавших газах перед SCR

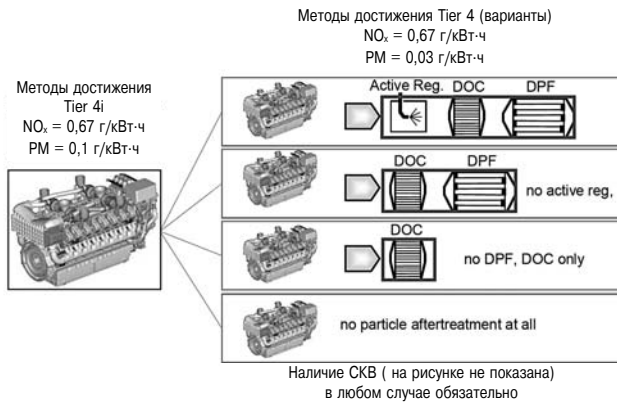


Рис. 9. Варианты достижения уровня требований EPA Tier 4 для дизель-генераторов:

Active reg. — активное регулирование; DOC — окислительный катализатор; DPF — фильтр твердых частиц

достижения требований EPA Tier 4i ($0,67 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$), оказывается в диапазоне примерно от 6 до $7,5 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$. Точкой отсчета на рис. 8 является стоимость топлива для двигателя, соответствующего требованиям EPA Tier 2 без очистки отработавших газов. Стоимость масла здесь не учитывается.

Для дальнейшого повышения топливной экономичности MTU использует умеренный цикл Миллера. Необходимый уровень давления воздуха на всасывании удалось обеспечить, не прибегая для этого к двухступенчатому наддуву. Таким путем удалось уменьшить расход топлива еще на 3 % при том же уровне выбросов NO_x , что и в случае использования SCR с «классическим» фазированием впрыска. В основном диапазоне рабочих параметров расход топлива не превышает $200 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$.

Дизель-генераторная машина EPA Tier 4i серии 4000 поставлена на производство в 2011 г. (в варианте для генератора на 60 Гц). Организация процесса сгорания, турбонаддув, система и фазирование впрыска были значительно улучшены по сравнению с версией EPA Tier 2, и могут послужить хорошей основой для окончательного варианта двигателя EPA Tier 4, запланированного на 2015 г.

Возможные пути достижения финального уровня EPA Tier 4 приведены на рис. 9. Последний вариант (без очистки ОГ от частиц) с точки зрения заказчиков представляется самым привлекательным. Он позволяет не только сэкономить значительные средства на начальных и эксплуатационных расходах, но и существенно уменьшить габариты установки, а также снизить трудоемкость обслуживания.

Выводы

На сегодняшний день MTU Friedrichshafen располагает большим количеством технологий обеспечения требований перспективных стандартов, в том числе:

- > цикл Миллера (изменение фаз газораспределения);
- > впрыск топлива под высоким давлением;
- > современные системы наддува;
- > рециркуляция отработавших газов;
- > очистка газов с применением SCR.

Как указывалось выше, для каждой группы двигателей (судовые, тепловозные и дизель-генераторы) могут быть предложены оптимальные технические решения, позволяющие не только обеспечить выполнение действующих и будущих экологических нормативов, но и снизить затраты полного срока эксплуатации двигателя. Особое внимание при этом должно быть уделено компактности используемых устройств, чтобы они могли вписываться в габариты существующих машинных отделений.

СОЗДАНИЕ НОВОГО ДВИГАТЕЛЯ CATERPILLAR VM32C LE С НИЗКИМ УРОВНЕМ ВЫБРОСОВ

*Ulrich Hopmann,
 Caterpillar Motoren GmbH und Co. KG, Германия*

История среднеоборотных двигателей Caterpillar/МаК с диаметром цилиндра 320 мм насчитывает уже не одно десятилетие. Дизель типа M453, созданный в начале 1970-х гг., успешно эксплуатировался как в судовых, так и в стационарных установках. Двигатель постоянно совершенствовался. Его последняя версия с обозначением «С» имеет цилиндровую мощность 368 кВт (табл. 1). В соответствии с программой развития дизелей МаК старая модель M453 в 1995 г. уступила место совершенно новому двигателю типа VM 32. Его цилиндровая мощность в судовом варианте составила 440 кВт.

Таблица 1

Основные технические характеристики судового V-образного двигателя

| | VM 453 C | VM 32 | VM 32 C | VM 32 C LE |
|---|----------|--------|---------|------------|
| Год выпуска | 1989 | 1995 | 2003 | 2011 |
| Число цилиндров | 12, 16 | 12, 16 | 12, 16 | 12, 16 |
| Цилиндровая мощность, кВт | 368 | 440 | 500 | 500 |
| Диаметр цилиндра, мм | 320 | 320 | 320 | 320 |
| Ход поршня, мм | 420 | 420 | 420 | 460 |
| Отношение хода поршня к диаметру цилиндра | 1,312 | 1,312 | 1,312 | 1,438 |
| Объем цилиндра, дм ³ | 33,8 | 33,8 | 33,8 | 37,0 |
| Скорость, об/мин | 600 | 750 | 750 | 750 |
| Среднее эффективное давление, МПа | 21,7 | 20,8 | 23,7 | 21,6 |
| Средняя скорость поршня, м/с | 8,4 | 10,5 | 10,5 | 11,5 |

Следующей модификацией, увидевшей свет в 2003 г., стала модификация дизеля VM 32 С. Его цилиндровая мощность достигла 500 кВт, а выбросы были снижены до значений, установленных стандартом IMO Tier 1. Этот двигатель также получил широкое распространение на судах и в стационарных условиях.

Последняя версия — VM 32 С LE, где символ LE обозначает «Low Emission», т. е. низкий уровень выбросов. Необходимость ее создания была вызвана ужесточением экологических нормативов, которые должны быть введены в действие в ближайшем будущем. Чтобы удовлетворить требованиям IMO Tier 2 и Tier 3 (вступающим в силу с января 2011 г. и с января 2016 г. соответственно), а также требованиям EPA Tier 2 и Tier 3, потребовалась более радикальная модернизация, в связи с чем была развернута обширная программа, основанная на глубоком изучении рынка и детальном технико-экономическом анализе. При этом была поставлена задача сохранить как можно больше компонентов, систем и решений, прочно зарекомендовавших себя на практике, чтобы новый двигатель как минимум не уступал своему прототипу в отношении надежности. Вместе с тем учет требований заказчиков, а также экологического законодательства потребовал коренного пересмотра конструкции. При этом были поставлены следующие цели:

- создать двигатель, не уступающий (или превосходящий) существующую модель по таким характеристикам, как надежность и удобство обслуживания;
- снизить выбросы NO_x;
- добиться бездымного выпуска во всем диапазоне нагрузок;
- снизить стоимость владения и эксплуатационные расходы.

Успех данной целевой программы был обеспечен использованием современных средств управления реализацией программ. Существенное ускорение работы было достигнуто за счет использования фирменных инструментов моделирования фирмы Caterpillar, что позволило оптимизировать такие характеристики, как расход топлива и вредные выбросы.

Конструкция двигателя

В ходе проектирования все вновь создаваемые или модернизируемые компоненты и системы были оптимизированы с использованием метода конечных элементов (МКЭ) и других инструментов моделирования. Для повышения технических характеристик и надежности конструкции широко использовался анализ характера и последствий отказов (FMEA — failure mode and effects analysis). Главным новшеством стало увеличение хода поршня с 420 до 460 мм. Это позволило более

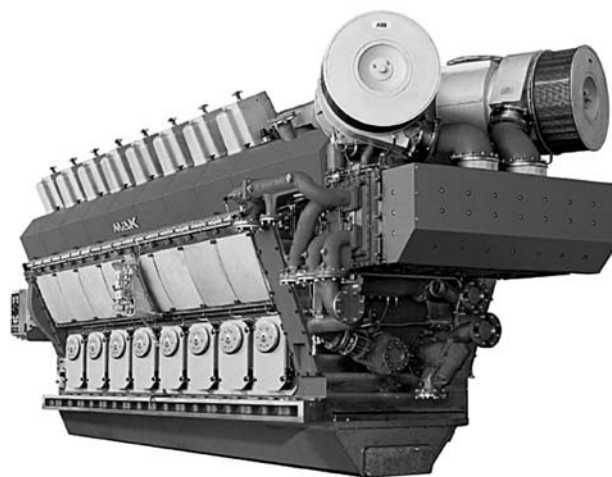


Рис. 1. Новый двигатель VM 32 С LE

широко варьировать параметры конструкции с тем, чтобы добиться снижения выбросов, не жертвуя расходом топлива. Именно это соображение, а не увеличение цилиндровой мощности, стало решающим при выборе нового значения хода поршня. Кроме того, увеличенный объем цилиндра при той же мощности означает снижение среднего эффективного давления, что способствует уменьшению нагрузки на детали двигателя и повышению надежности.

Компоненты двигателя

Коленвал. Поскольку прежняя геометрия блока цилиндров была сохранена, диаметр коренных подшипников и расстояние между цилиндрами также не претерпели изменений. Еще одним условием, поставленным перед проектировщиками, было сохранение конструкции и размеров маховика. Чтобы увеличить ход поршня с соблюдением указанных ограничений, был проведен расчет крутильных колебаний коленвала методом конечных элементов (рис. 2). Увеличение хода поршня повлекло за собой необходимость увеличения диаметра кривошипного подшипника. Кроме того, несколько увеличилась толщина шеек коленвала, была изменена геометрия про-

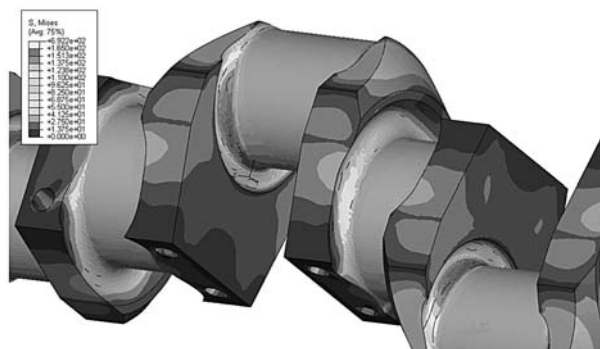


Рис. 2. Пример модели коленвала для расчет крутильных колебаний с помощью МКЭ

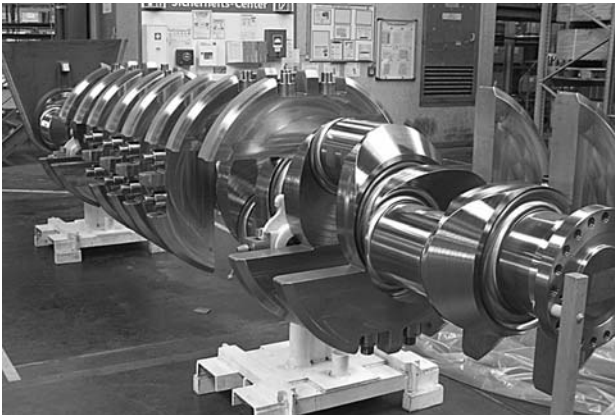


Рис. 3. Коленвал с противовесами

тивовесов, и был увеличен диаметр болтов противовесов (рис. 3).

Шатун. Увеличение хода поршня при сохранении геометрии блока потребовало изменения конструкции шатуна, так, чтобы обеспечивался достаточный зазор между шатуном и втулкой цилиндра. Поэтому стык между стержнем шатуна и головкой пришлось сместить вниз (рис. 4). Подобная конструкция, известная как морской (или составной) шатун, использовалась на двигателях Caterpillar Motoren старой конструкции.

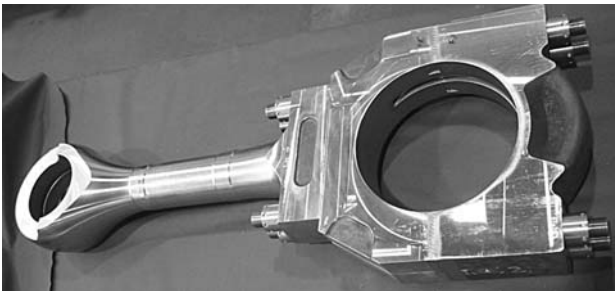


Рис. 4. Новый шатун

На основании интенсивных исследований с использованием МКЭ была выбрана схема соединения верхней и нижней частей шатуна на четырех болтах. Для упрощения расчетов модель шатуна была представлена в виде двух симметричных половин, состыкованных по вертикали.

Подшипники. Увеличение хода поршня влияет, хотя и не очень сильно, на условия работы подшипников. Чтобы гарантировать безусловную надежность работы, пришлось несколько изменить конструкцию верхней и нижней головок шатуна.

Увеличение диаметра шатунной шейки повлекло за собой необходимость изменения конструкции подшипника. Чтобы по возможности сохранить преимущество по отношению к прежней конструкции, подшипник был просто несколько увеличен в размерах, но его форма и материал остались прежними.

Поршень, поршневые кольца и втулка цилиндра. Средняя скорость поршня двигателя VM32 C LE



Рис. 5. Трехмерная модель процесса сгорания

равна 11,5 м/с, что близко к рекордным показателям для данного класса машин. Это вызвало необходимость углубленного исследования, в основу которого были положены следующие факторы:

- собственный опыт фирмы «Caterpillar» в создании высокооборотных двигателей;
- разработки фирмы в области моделирования динамики поршневых колец;
- предварительные стендовые испытания на среднеоборотном двигателе.

В результате было найдено оптимальное решение для всего комплекта поршневых колец, правильность которого была подтверждена результатами испытаний на 16-цилиндровом двигателе VM 32 C LE. Новые поршневые кольца позволяют поддерживать более высокую степень сжатия.

Для оптимизации формы камеры сгорания в поршне использовался фирменный программный пакет трехмерного моделирования процесса сгорания (рис. 5). Остальные элементы конструкции, способные как-то повлиять на прочность и теплонапряженность двигателя, оставлены без изменений.

Дальнейшее расчетно-экспериментальное исследование показало, что конструкция цилиндровой втулки может быть полностью сохранена.

Клапанный механизм. Была сохранена также конструкция всех основных деталей клапанного механизма, т. е. кулачкового вала, коромысел, клапанов и седел.

Отличительной чертой двигателей «Caterpillar Motoren» является технология Flex Cam Technology (FCT), обеспечивающая низкие значения вредных выбросов. Эта технологи использована и в новом двигателе VM 32 C LE. Механизм FCT (рис. 6) обеспечивает рычажное управление углами открытия впускных клапанов, а также давлением и фазами впрыска для снижения дымления.

Помимо адаптации механизма FCT к новому двигателю, были внесены определенные изменения в конструкцию отдельных узлов. В частности, кулак выпускного клапана и его пружина были

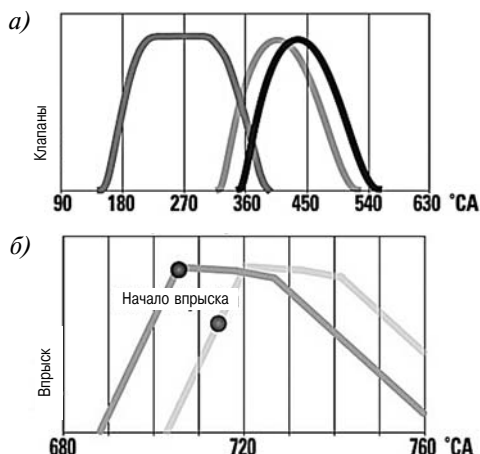
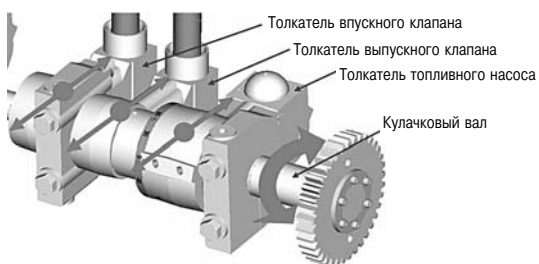


Рис. 6. Схема механизма ФСТ:

a — система регулируемого привода клапанов (схема задержки открытия впускного клапана для отключения цикла Миллера); *б* — система регулируемого давления впрыска

измены в сторону большего открытия клапана. Результаты описаны в разделе «Газообмен».

Системы подачи воздуха

Турбонаддув. Систему турбонаддува нового двигателя отличают следующие особенности:

- постоянство давления наддува;
- одноступенчатый наддув (по одному турбокомпрессору на каждый ряд цилиндров).

Система подачи воздуха рассчитана таким образом, чтобы обеспечить достаточное давление наддува во всем диапазоне рабочих режимов. Существенным преимуществом данной системы является высокая температура отработавших газов, благодаря чему предотвращается засорение турбины при работе на тяжелых топливах. Следует отметить, что указанная цель достигается без использования каких-либо байпасов и тому подобных механических устройств в газоздушном тракте.

Принятая концепция снижения выбросов не требует высокого давления наддува, поэтому механическая нагрузка на турбокомпрессор невелика, что позволяет обойтись применением проверенного и надежного турбокомпрессора существующей конструкции.

Газообмен. Неотъемлемой частью технологии снижения выбросов, используемой Caterpillar Motoren, является цикл Миллера, позволяющий снизить температуру сгорания за счет изменения

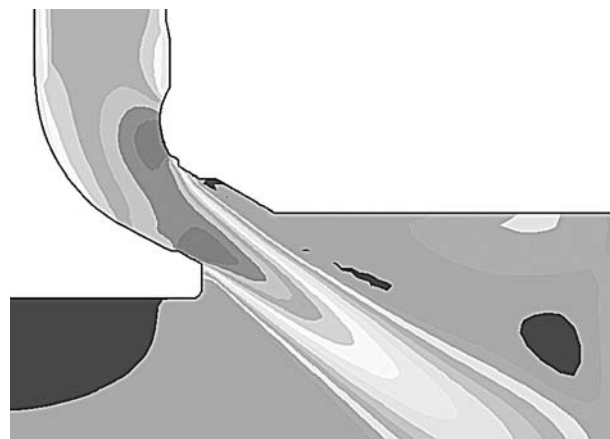


Рис. 7. Моделирование потока отработавших газов через головку цилиндра

фаз газораспределения, что приводит к снижению выбросов NO_x . Как известно, применение цикла Миллера связано с необходимостью значительного более высокого, по сравнению с традиционными двигателями, давления наддува. В данном случае необходимость повышения давления наддува устраняется за счет снижения среднего эффективного давления из-за увеличенного хода поршня.

Поскольку давление наддува не меняется, остаются только два фактора, влияющие на процесс газообмена, — фазы газораспределения, присущие циклу Миллера, и скорость поршня. Как показало проведенное расчетно-экспериментальное исследование, увеличение скорости поршня вызывает соответствующее увеличение потерь трения в газоздушном тракте.

Головка цилиндра существующего двигателя М 32 хорошо отработана, а ее воздушные и га-

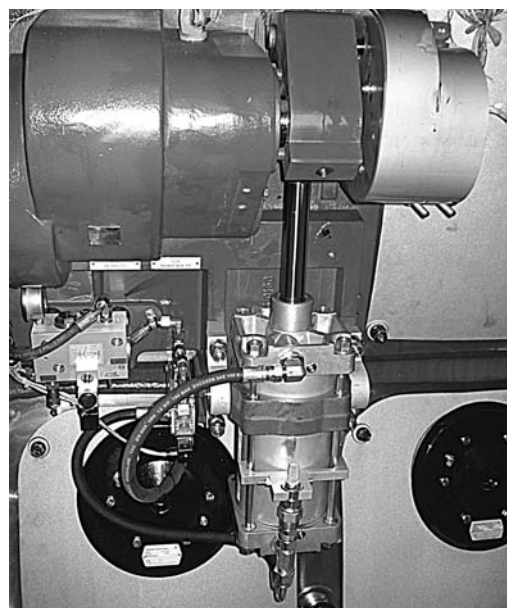


Рис. 8. Блок ФСТ для регулирования углов топливоподачи

зовые каналы оптимизированы для существующих значений расхода. Во избежание возрастания насосных потерь было решено увеличить высоту подъема выпускного клапана примерно на 15 %. Для расчета необходимой высоты подъема клапана и оптимизации геометрии тракта использовалось моделирование гидродинамики потока. На рис. 7 показан профиль распределения скорости по высоте клапана. В результате оптимизации расход газов увеличился примерно на 5 %.

Механизм FCT оказывает влияние на газообмен при работе на частичных нагрузках (см. выше). Например, на двигателе с пониженными выбросами MaK M 43 C, оборудованном системой FCT, уже удалось добиться снижения выбросов до уровня, соответствующего IMO Tier 2. На рис. 8 показан механизм FCT с пневмоприводом.

Система впрыска common rail

Система впрыска «Caterpillar Motoren» типа «common rail» для двигателей, работающих на тяжелых топливах, уже прошла всесторонние испытания и одобрена для применения на рядных двигателях M32, а также сертифицирована основными классификационными обществами. Она доказала свою надежность и эффективность как в ходе ресурсных испытаний, так и в процессе эксплуатации на объектах потребителей. Данная система с небольшими изменениями была адаптирована к дизелю VM32 C LE (рис. 9).

В этом двигателе применены несколько модифицированные конструкции редуктора и привода топливного насоса высокого давления (ТНВД), используемые в существующих рядных двигателях. Все остальные основные компоненты, такие как насосы, клапаны, форсунки, датчики и блок

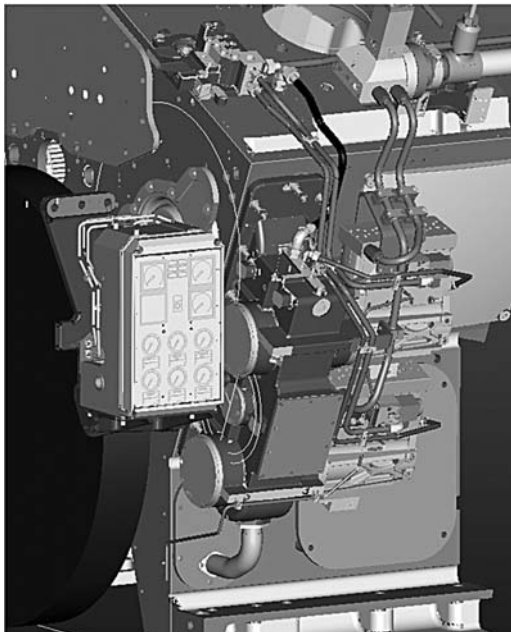


Рис. 9. Система впрыска common rail

управления, целиком заимствованы от существующих рядных двигателей.

Система common rail является одной из возможных опций, и может устанавливаться по желанию заказчика как альтернатива традиционной системе впрыска. В качестве топлива в системе common rail могут использоваться газойль, тяжелое топливо и флотский мазут.

Типовые испытания

Первый опытный образец двигателя 16 M32C LE был изготовлен и поставлен на испытания, программа которых предусматривает всестороннее исследование дизеля и его компонентов. В программу вошли также ресурсные испытания с циклической нагрузкой.

Первые результаты испытаний двигателя, оснащенного полным комплектом измерительной аппаратуры, подтвердили достижение целевых показателей по основным параметрам, таким как температуры отработавших газов, расход воздуха и давление наддува. Испытания подтвердили также достижение целевых показателей по выбросам NO_x и PM, при этом параметры теплонапряженности основных компонентов (например, температура седла клапана) оказались вполне удовлетворительными.

Цикл испытаний завершен на объектах заказчиков на нескольких машинах в течение нескольких тысяч часов. Эти испытания должны подтвердить эксплуатационную надежность нового дизеля.

Заключение

Новый двигатель VM 32 C LE был создан непосредственно на основе своего предшественника. При его разработке ставилась задача сохранить как можно больше проверенных временем и зарекомендовавших себя компонентов, систем и конструктивных решений. В то же время поставленная цель — достижение экологических показателей, соответствующих требованиям IMO Tier 2, а также EPA Tier 2 — потребовала внесения целого ряда конструктивных новшеств. Основным конструктивным нововведением стало увеличение хода поршня. Оно позволило осуществить ряд «внутренних» мероприятий, направленных на снижение выбросов NO_x и PM, сохраняя при этом низкий уровень эксплуатационных расходов. Были изменены конструкции коленвала и шатуна, оптимизированы параметры рабочего процесса и газоздушного тракта. Для снижения вредных выбросов в новом двигателе VM 32 C LE была применена технология «Caterpillar Motoren», известная как Flex Cam Technology (FCT), с соответствующей адаптацией. В качестве опции предусмотрена возможность использования в новом двигателе системы впрыска типа common rail для работы на тяжелых топливах.