

ТЕХНОЛОГИИ СНИЖЕНИЯ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ ДИЗЕЛЕЙ. СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ.

ПО МАТЕРИАЛАМ КОНГРЕССА СИМАС 2010

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

Последовательное снижение нормативов выбросов для поршневых двигателей всех назначений стимулирует опережающее развитие природоохранных технологий. В ближайшей перспективе (в течение 4-5 лет) уровень вредных выбросов должен быть снижен не менее чем на 80 %. Разработанные и экспериментально апробированные производителями двигателей технологии подразделяются на «внутренние», основанные на управлении процессами внутри цилиндра и «внешние», основанные на очистке газов после выпуска из цилиндра. Фирма MAN Diesel & Turbo SE предлагает анализ состояния разработанных технологий для выбора стратегии развития своей продукции.

СРЕДНЕОБОРОТНЫЕ ДИЗЕЛИ НА ПУТИ К IMO TIER III. ОЧИСТКА ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ИЛИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА — ЧТО ПРЕДПОЧЕСТЬ?

*Georg Tinschmann, Dirk Thum, Stephan Schlueter, Petar Pelemis, Gunnar Stiesch,
MAN Diesel & Turbo SE, Германия*

Мощные дизели, способные работать на тяжелых топливах (Heavy Fuel Oil — HFO), не знают себе равных по таким показателям, как топливная экономичность и ресурс работы. Именно поэтому они используются в качестве главных двигателей на 95 % судов мирового гражданского флота. Морские суда представляют собой наиболее экономичный и экологически чистый вид транспорта. Тем не менее, количество выбросов окислов азота (NO_x) и серы (SO_x) от двигателей морских судов непрерывно растет, особенно в зонах наиболее интенсивного судоходства и в портах.

Первый международный нормативный документ, ограничивающий вредные выбросы от судовых дизелей, был выпущен Международной Морской Организацией (IMO) в виде Приложения VI к конвенции MARPOL 73/78. Действие этого документа вступило в силу в 2005 г., распространялось на все суда, построенные после 1 января 2000 г. и ограничивало выбросы NO_x на уровне IMO Tier 1. С 01.07.2010 г. введен в действие норматив IMO Tier 2, предусматривающий снижение выбросов NO_x на 15–22 %. На 2016 г.

намечено введение в действие норматива IMO Tier 3, который предусматривает снижение выбросов NO_x на 80 % (по сравнению с IMO Tier 1) в определенных акваториях, так называемых «зонах регулируемых выбросов» (Emission Control Areas — ECA).

Зоны регулируемых выбросов окислов серы (SO_x Emission Control Areas — SECA) также определены IMO. В этих зонах дизели должны работать на топливе с содержанием серы не более 1,5 %, или должны использоваться эффективные средства очистки отработавших газов (ОГ). Поскольку количество серы в топливе оказывает влияние на содержание частиц в ОГ, содержание серы в топливе судовых дизелей ограничивается не только для зон SECA, но и для других районов плавания.

MAN Diesel активно разрабатывает технологии, которые позволили бы снизить выбросы до действующих и перспективных норм IMO. При этом исследователям MAN Diesel SE предстояло ответить на следующие вопросы:

➤ Какая технология достижения уровня выбросов NO_x IMO Tier 3 может считаться оптимальной с точки зрения минимизации начальных вложений и эксплуатационных расходов?

➤ Является ли очистка отработавших газов единственным разумным средством снижения выбросов, или же следует рассматривать и другие методы, например, цикл Миллера и рециркуляция ОГ?

➤ Есть ли необходимость в перенастройке двигателя при заходе в зону ECA (где требования изменяются от Tier 2 к Tier 3)

➤ Какие преимущества дает использование скруббера, и какие возникают проблемы, если при входе в зону SECA переключение на другой вид топлива невозможно или нежелательно?

➤ Какие решения можно считать оптимальными для относительно маломощных дизель-генераторов, и какие — для главных двигателей большой мощности?

1. Введение

Для морских судов, заложенных после 1 января 2011 г., нормативы выбросов NO_x на уровне IMO Tier 2 стали обязательными для флотов

всего мира (табл. 1). Для достижения этого уровня оказывается достаточно одних только «внутренних» средств. Их использование позволило MAN Diesel создать законченный ряд двигателей, удовлетворяющих требованиям IMO Tier 2.

Что же касается нормативов Tier 3, распространяющихся на суда, заложенные после 1 января 2016 г., то они предусматривают дифференциацию в зависимости от района плавания судна. Для плавания в открытом море нормативы Tier 2 остаются в силе и после 2016 г., тогда как для плавания в зонах регулируемых выбросов (ЕСА) обязательным становится 80-процентное снижение NO_x , по сравнению с Tier 1. Кроме того, в Tier 3 впервые появился пункт, устанавливающий требование «непревышения». Это означает, что среднецикловой предельный уровень NO_x не должен быть превышен более чем на 50 % при любой (частичной) нагрузке двигателя. На сегодняшний день в число ЕСА уже вошли Балтийское и Северное моря, включая Ла-Манш. В заявку на получение статуса ЕСА включена береговая зона США и Канады. В настоящее время в IMO обсуждается вопрос о включении в состав ЕСА Средиземного моря и нескольких крупных мировых портов по перегрузке контейнеров (рис. 1).

Помимо окислов азота, правилами IMO ограничиваются также выбросы окислов серы. Действующие нормативы ограничивают содержание серы в топливе, однако законодательство допускает и другой способ ограничения выбросов серы, устанавливая предельно допустимую концентрацию SO_x в отработавших газах. Следует отметить, что на выбросы SO_x (в отличие от NO_x) процесс сгорания сам по себе никак не влияет. Вся сера, попадающая с топливом в камеру сгорания, уходит в атмосферу в виде SO_x . Это значит, что уменьшить выбросы SO_x можно лишь одним из двух способов: либо за счет использования малосернистого топлива, либо за счет очистки ОГ. На рис. 2 показаны ограничения IMO на содержание SO_x в ОГ (выраженные через ПДК серы в топливе) внутри зон ЕСА и за их пределами, а также годы вступления соответствующих нормативов в силу. Следует помнить, что,



Рис. 1. Существующие, планируемые и обсуждаемые зоны ограниченных выбросов

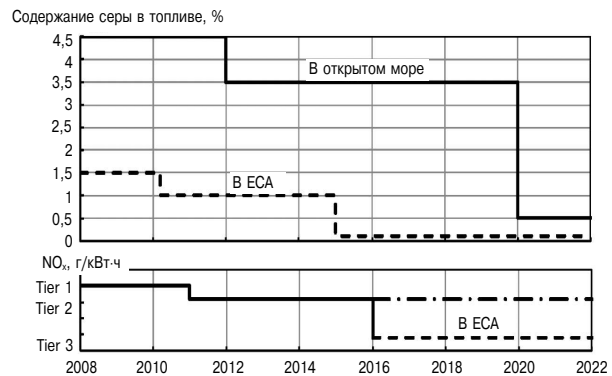


Рис. 2. Ограничения IMO по содержанию серы (SO_x) и NO_x

помимо общих ограничений, установленных IMO, существуют также региональные ограничения. Например, для портов стран Евросоюза установлено предельное содержание серы в топливе 0,1 %.

В настоящем докладе приводится обзор основных методов снижения выбросов NO_x и SO_x и описываются самые интересные и наиболее вероятные сценарии достижения уровня Tier 3 для среднеоборотных двигателей.

2. Технологии снижения выбросов NO_x (рис. 3)

Помимо достаточно известных и проверенных временем решений, в настоящее время все большее внимание конструкторов привлекают такие методы, как оптимизация процесса сгорания, совершенствование систем турбонаддува и впрыска топлива. Дифференциация нормативов в зависимости от района плавания требует создания систем, которые, помимо надежности и эффективности, обладали бы достаточной управляемостью. «Внутренние средства»

Для достижения уровня IMO Tier 2 (т. е. снижения выбросов NO_x на 20 % и более) используется цикл Миллера в сочетании с высо-

Таблица 1

Предельные значения IMO NO_x

Номинальная скорость дизеля	$n < 130$	$130 < n < 2000$	$n > 2000$
Tier 1 NO_x [г/кВт·ч] (2000)	17,0	$45 \cdot n^{-0,2}$	9,84
Tier 2 NO_x [г/кВт·ч] (2011)	14,36	$44 \cdot n^{-0,23}$	7,66
Tier 3 NO_x [г/кВт·ч] (2016) в пределах ЕСА	3,4	$9 \cdot n^{-0,2}$	1,97

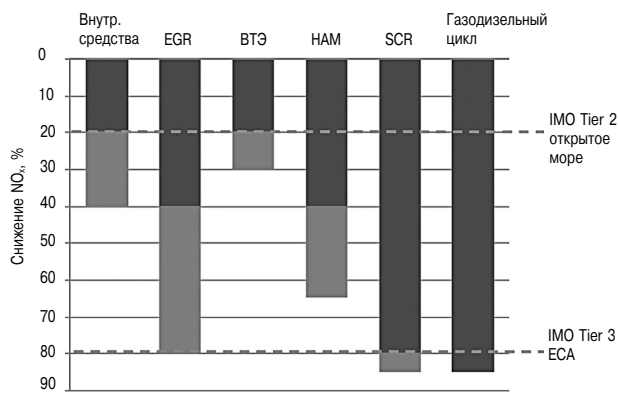


Рис. 3. Эффективность различных способов снижения выбросов NO_x

ким наддувом (в одной ступени) и оптимизированной системой впрыска высокого давления. Идея цикла Миллера состоит в понижении температуры сгорания за счет более позднего закрытия впускного клапана, что приводит к охлаждению воздуха в результате его расширения. Высокий наддув в этом случае необходим для того, чтобы избежать потери мощности или снижения КПД. Кроме того, для повышения рабочих параметров при частичных нагрузках применяется регулирование углов открытия клапанов. MAN Diesel уже выпускает подобные оптимизированные системы серийно.

Дальнейшее повышение эффективности возможно за счет применения двухступенчатого наддува, которая позволяет сократить выбросы NO_x на 40 % — цифра, подтвержденная заводскими испытаниями. Поэтому следующим важнейшим шагом является создание управляемой системы двухступенчатого наддува MAN Diesel.

Даже если упомянутые выше мероприятия не смогут обеспечить снижение выбросов NO_x на 80 % (до уровня Tier 3 в зонах ECA), они позволят создать оптимизированную и управляемую систему сгорания, которая может стать основой для всех последующих разработок.

Увлажнение рабочей смеси

Известны несколько способов снижения выбросов NO_x путем добавления воды в камеру сгорания, в том числе:

- использование водотопливной эмульсии (ВТЭ);
- увлажнение наддувочного воздуха — метод, известный в зарубежной литературе как Humid Air Motor (HAM).

Идея обоих способов состоит в использовании водяного пара для уменьшения максимальной температуры сгорания, что приводит к снижению выбросов NO_x. Прямой впрыск воды в камеру сгорания связан с нежелательными побочными эффектами, такими, как плохая гомогенизация заряда, увеличение расхода топлива, кавитация

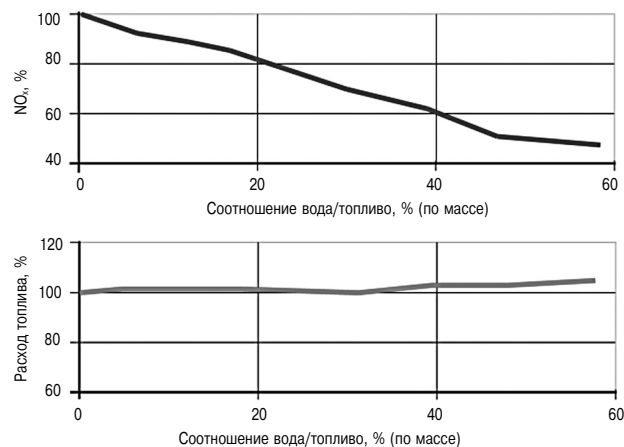


Рис. 4. Влияние ВТЭ на выбросы NO_x и расход топлива

и коррозия. Поэтому MAN Diesel сразу отказался от его использования.

Идея использования ВТЭ состоит в смешивании топлива с водой перед впрыском. Результат проведенных MAN Diesel испытаний показал, что данный способ может обеспечить снижение выбросов NO_x на величину до 30 %. При содержании воды в эмульсии более 30 % расход топлива увеличивается настолько, что применение ВТЭ становится экономически нецелесообразным. Тем не менее, MAN Diesel уже с конца 1990-х гг. предлагает этот способ как одно из возможных средств выполнения требований Tier 2 для новых и модернизируемых двигателей.

Концепция увлажнения наддувочного воздуха (HAM) основана на насыщении наддувочного воздуха водой. Фирмой разработана так называемая «Патентованная система теплообмена MAN», снижающая, согласно результатам эксплуатационных испытаний, выбросы NO_x до 65 %. Ее идея состоит в подогреве впрыскиваемой воды для повышения степени насыщения. В отличие от ВТЭ система HAM может работать на морской воде. Главный недостаток этого метода заключается в том, что он приводит к росту давления наддувочного воздуха, что, в свою очередь, с учетом ограничения температуры заряда, не позволяет достичь оптимальной степени насыщения (рис. 5). Реализация этого метода связана со значительными вложениями. Кроме того, для размещения модуля HAM требуется дополнительное место в машинном отделении. MAN Diesel с 1999 г. предлагает данный метод, наряду с ВТЭ, в качестве альтернативного средства, применяемого при модернизации существующих двигателей для снижения выбросов NO_x до требований Tier 2 и ниже.

Хотя увлажнение рабочей смеси само по себе не в состоянии обеспечить выполнение требований Tier 3, в определенных случаях есть смысл его

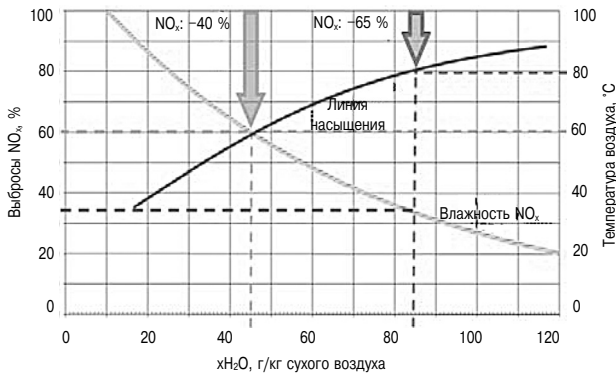


Рис. 5. Кривые насыщения и снижения NO_x

использовать в качестве вспомогательного средства, как в текущих, так и в будущих проектах.

Селективное каталитическое восстановление

Селективное каталитическое восстановление (SCR) на сегодняшний день является самым надежным и проверенным методом, позволяющим снизить выбросы NO_x на величину до 90 %. Целый ряд установок различного назначения с дизелями MAN, оборудованными системой SCR, успешно эксплуатируется уже в течение многих лет. Данный метод основан на впрыске водного раствора мочевины в выпускной тракт дизеля с целью восстановления NO_x до N₂ в присутствии катализаторов. Более подробно данный процесс описан в части 4.

При этом наибольшую сложность представляет согласование работы всех компонентов системы, состоящей из двигателя, агрегата подачи мочевины и модуля SCR. Для предотвращения утечки аммиака в окружающую среду используется устройство интеллектуального управления подачей мочевины, встраиваемое в систему управления двигателем. Оптимизация процесса газоочистки возможна лишь при условии согласованного управления рабочими параметрами двигателя и подачи мочевины.

Рециркуляция отработавших газов (EGR)

Идея рециркуляции ОГ заключается в уменьшении концентрации кислорода в наддувочном воздухе с целью снижения температуры сгорания. Как показали заводские испытания, данный метод в сочетании с «циклом Миллера», двухступенчатым высоким наддувом и топливной системой типа common rail позволяет обеспечить снижение выбросов NO_x до 80 %. В части 5 дается более подробное описание этого процесса и приводится анализ результатов испытаний. Преимуществом метода EGR является отсутствие зависимости от внешних реагентов, таких, как мочевина или вода. Его определенный недостаток — необходимость использования малосернистого топлива или даже дистиллята во избежание коррозии деталей двигателя. Метод EGR

следует выбирать в качестве средства выполнения требований Tier 3 только после проведения всестороннего экономического анализа, если такой анализ покажет преимущества данного метода перед SCR для данного конкретного применения.

3. Сравнительная оценка различных методов

Сравнительная оценка наиболее перспективных методов производится путем сопоставления затрат оператора за срок службы оборудования при использовании того или иного метода. При этом учитываются: первоначальная стоимость оборудования, эксплуатационные расходы, а также стоимость всех расходных материалов.

В качестве базового образца для вновь разрабатываемых среднеоборотных машин MAN Diesel был выбран новый двигатель типа 6L32/44CR (соответствует Tier 2). Он оборудован системой впрыска типа common rail и одноступенчатой системой наддува. Вариант (0) принят в качестве базового для анализа расходов за срок службы двигателя конфигурации Tier 2.

Вариант (1) оборудован EGR для достижения уровня Tier 3. Эти две конфигурации сравниваются с вариантом (2), в качестве которого выбран дизель типа 6L32/44CR с двухступенчатым наддувом и SCR. Исходные параметры для расчетов сведены в табл. 2. Характеристики сравниваемых вариантов представлены в табл. 3. Помимо упомянутых выше двигателей IMO Tier 3, к перечню для сравнения добавлен двигатель, соединяющий в себе ряд «внутренних» средств, включая EGR, двухступенчатый наддув и систему common rail с функцией множественных впрысков — вариант (3).

Расчеты затрат за срок службы показывают, что при введении IMO Tier 3 эти затраты по сравнению с Tier 2 скорее всего увеличатся. Ожидаемое увеличение затрат составит от 1,6 до 7,6 %, в зависимости от доли ECA в маршрутах судна и применяемых технологий (рис. 6).

Сравнение вариантов (1) и (2) с SCR по стоимости в течение срока службы (10 лет) показывает, что вариант (2) оказывается дешевле примерно на 4 %. Дополнительные вложения,

Таблица 2

Исходные параметры для расчета

Плановый ресурс	10	лет
Время работы / в год	6000	ч
Доля ECA	0–100	%
Процентная ставка	10	%
Цена тяжелого дизельного топлива (HFO)	320,00	EUR/T
Цена малосернистого топлива (LSFO)	325,00	EUR/T
Цена морского газойля (MGO)	440,00	EUR/T
Цена мочевины	270,00	EUR/T

Таблица 3

Методы достижения IMO Tier 3 (4-тактные двигатели)

Вариант	Исходная конфигурация дизеля	Технология ограничения выбросов	Очистка выпускных газов	Уровень NO _x	Класс топлива	
					внутри ЕСА	вне ЕСА
0	Tier 2	Common Rail Одноступенчатый наддув с перепуском	Отсутствует	Tier 2	MGO	HFO
1	Tier 2	Common Rail Одноступенчатый наддув с перепуском	SCR	Tier 3	MGO	HFO
2	Tier 2	Common Rail Двухступенчатый наддув (РТК)	SCR	Tier 3	MGO	HFO
3	Tier 3	Common Rail Двухступенчатый наддув (РТК) Множественный впрыск Рециркуляция отработавших газов	Не требуется	Tier 3	MGO	HFO

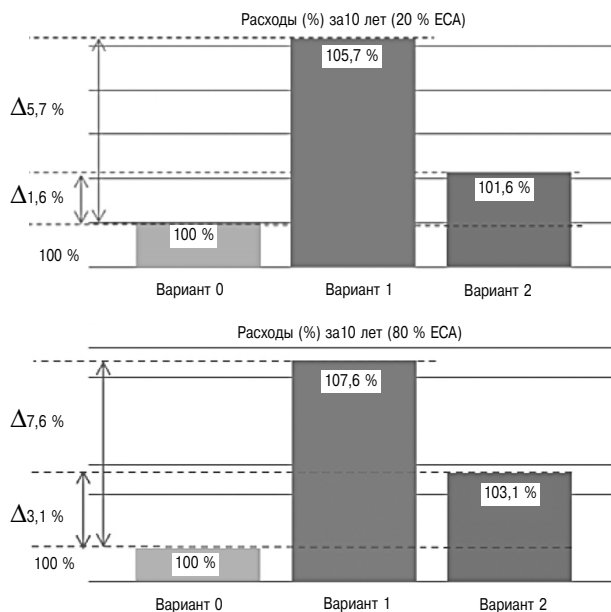


Рис. 6. Сравнительная стоимость IMO Tier 2 (SCR) и IMO Tier 2 (SCR с 2-ступенчатым наддувом)

связанные с применением двухступенчатого наддува, окупаются менее чем за 2,5 года благодаря снижению расхода топлива на 3–5 % (в зависимости от нагрузки). Кроме того, двухступенчатый наддув позволяет повысить мощность двигателя практически без ущерба для его экономичности и показателей выбросов NO_x, что даст возможность приблизить по удельным затратам дизель с двухступенчатым наддувом к исходному варианту (с одноступенчатым наддувом).

Эксплуатационные затраты в обоих случаях (варианты 1 и 2) возрастают из-за необходимости расходовать мочевины при нахождении в зонах ЕСА. Чем больше относительное время плавания в этих зонах, тем больше расход мочевины. От-

сюда ясно, что вариант (3), не требующий расходных материалов, становится наиболее предпочтительным для судов, проводящих в зонах ЕСА значительную часть времени.

При работе вне зон ЕСА варианты (3) и (2) с точки зрения расхода топлива равнозначны. Чтобы выбросы внутри зон ЕСА оставались в пределах норм Tier 3, система EGR должна работать, что приводит к увеличению расхода топлива на 2–4 %.

Для варианта (2) можно непосредственно сравнить стоимость дополнительно израсходованного топлива

со стоимостью мочевины. Что касается варианта (3), то, помимо упомянутых выше затрат, потребуются дополнительные начальные вложения на оборудование двигателя системой EGR. С учетом разницы в начальных и эксплуатационных расходах можно с некоторым приближением сказать, что вариант (3) представляет практический интерес в тех случаях, когда относительное время плавания в зонах ЕСА превышает 50 % (рис. 7).

Во всяком случае, становится понятно, что оба варианта — (2) и (3) — с точки зрения стоимости в течение срока службы достаточно близки, поскольку разница в суммарных затратах в течение 10 лет при 100-процентном нахождении в зонах ЕСА не превышает 100 000 Евро.

Если говорить об известных на сегодняшний день решениях, простейшим вариантом представляется использование технологий IMO Tier 2 в сочетании с SCR. Дополнительную экономию дает применение двухступенчатого наддува. Для судов, плавающих преимущественно в зонах ЕСА, целесообразным представляется также исполь-

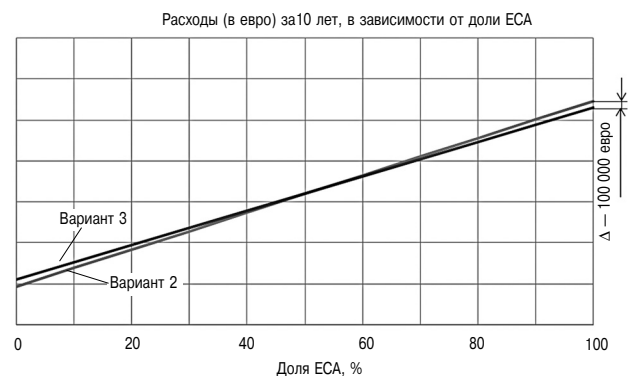


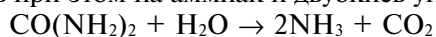
Рис. 7. Сравнение IMO Tier 2, 2-ступенчатый наддув, SCR (вариант 2) и IMO Tier 3, EGR (вариант 3)

зование «внутренних» методов в сочетании с EGR, системами common rail и двухступенчатым наддувом.

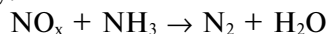
4. Селективное каталитическое восстановление

В основе процесса селективного каталитического восстановления (SCR) лежит использование катализатора для преобразования содержащихся в ОГ окислов азота в азот и воду с помощью NH_3 . Следует, однако, помнить о том, что NH_3 является вредным веществом, требующем крайне осторожного обращения во избежание серьезного ущерба для здоровья людей и окружающей среды. Поэтому инженеры обратились к использованию мочевины в качестве источника NH_3 . Мочевина безвредна, а транспортировка и использование ее водного раствора не требуют особых мер предосторожности. В настоящее время растворы мочевины с концентрацией 32,5 или 40 % успешно используются в системах SCR сухопутных и морских транспортных средств.

Каталитическая реакция протекает в два этапа. На первом этапе мочевина, попадая в поток горячих газов, реагирует с водой, содержащейся в растворе мочевины и в отработавших газах, разлагаясь при этом на аммиак и двуокись углерода:



Собственно процесс восстановления NO_x протекает при участии катализатора, где с помощью аммиака окислы азота преобразуются в азот и воду:



Превышение подачи мочевины над стехиометрической нормой вызывает утечку аммиака за пределы системы. Такая утечка экологически опасна и недопустима, поэтому необходимо строго дозировать подачу мочевины. Для того чтобы поддерживать эффективность восстановления NO_x на максимальном уровне, не допуская в то же время утечки аммиака, требуется замкнутая система регулирования, работающая от датчиков концентрации NO_x . К сожалению, необходимое для этого измерительное оборудование весьма чувствительно к внешним воздействиям, поэтому его применение в судовых условиях требует тщательного и достаточно трудоемкого техобслуживания. Альтернативой замкнутой системе является разомкнутая система параметрического регулирования, эффективность которой зависит от точности определения характеристик двигателя.

Почти все существующие системы SCR для самых различных установок основаны на описанных выше реакциях. В отличие от высокооборотных автотракторных, локомотивных и т. п. двигателей, работающих на дистиллятных топливах, применение SCR в среднеоборотных дизелях, работающих на тяжелых топливах,

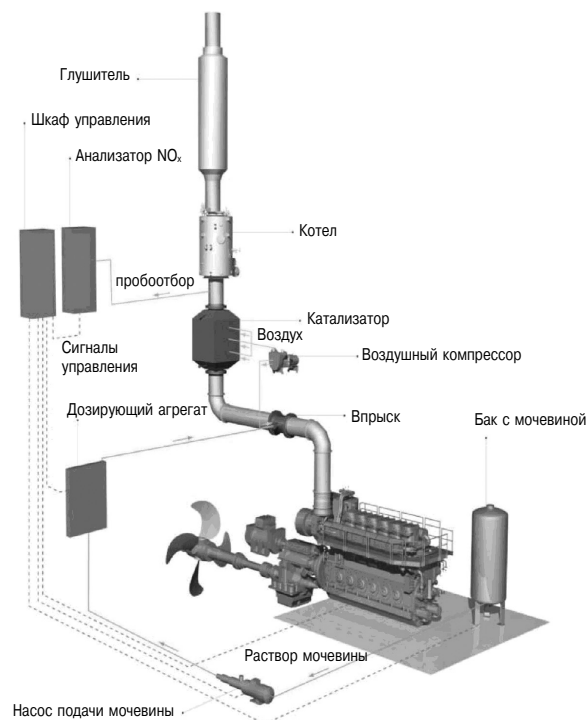


Рис. 8. Стандартная конфигурация среднеоборотного двигателя с SCR

связано с дополнительными проблемами. Во-первых, рабочий процесс среднеоборотных дизелей рассчитан на гораздо более низкие значения противодавления на выпуске. Учитывая типичную для таких дизелей конфигурацию выпускного тракта, включающую, как правило, котел-утилизатор (рис. 8) и глушитель, поддержание противодавления в допустимых пределах оказывается непростой задачей.

Мазут может содержать в своем составе значительное количество золы и серы. Зола загрязняет слои катализатора, поэтому с ней необходимо бороться во избежание засорения каталитического преобразователя. Для этого есть два способа: увеличение зазора между слоями, чтобы он не смог зарости полностью, или применение воздухоудвки для удаления сажи. В последнем случае для каждого слоя используется отдельная воздухоудвка, поток воздуха от которой периодически сдувает всю золу и пепел с поверхности катализатора.

Другая проблема заключается в большом содержании серы в топливе, обычно используемом в среднеоборотных дизелях. Если температура газа падает ниже определенного значения, зависящего от содержания серы в топливе, аммиак вступает в реакцию с окислами серы, образуя сульфат аммония (рис. 9). Он представляет собой плотную клейкую массу, покрывающую поверхность катализатора. При этом эффективность восстановления NO_x падает, а противодавление на выпуске растет.

Одним из следствий высокого КПД, свойственного среднеоборотным двигателям, является

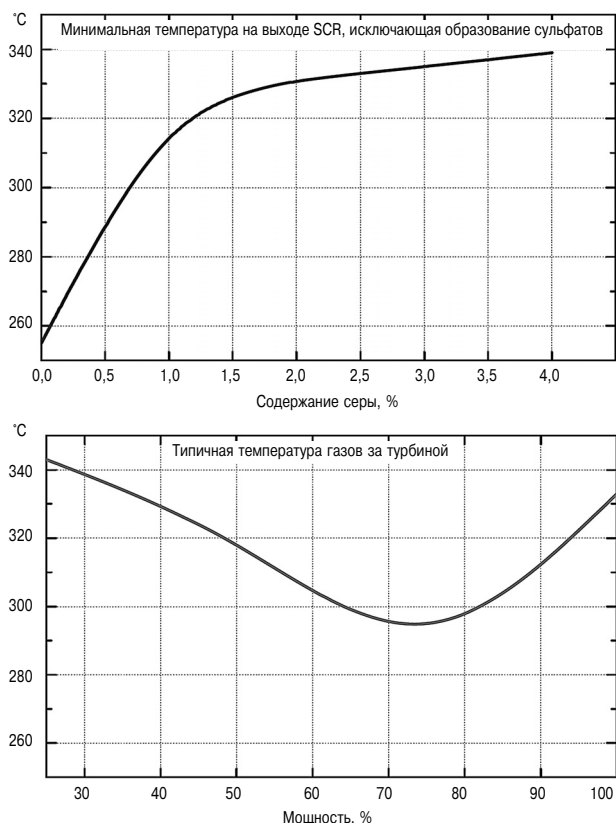


Рис. 9. Необходимое и типичные значения температуры отработавших газов

высокая температура газов после турбины, которая близка к предельно допустимой. Установка катализатора перед турбокомпрессором, практикуемая в малооборотных двигателях, в данном случае не подходит. При температуре свыше 500 °C аммиак, прежде чем вступить в реакцию восстановления NO_x, просто сгорит. Один из способов избежать образования сульфата аммония — отключить подачу мочевины. Сам по себе катализатор в состоянии выдержать присутствие большого количества серы без каких-либо последствий, при условии, что подача мочевины отключена. Такой вариант возможен при нахождении судна вне зон ECA, где нет необходимости в использовании SCR для того, чтобы уложиться в нормы выбросов. При установке SCR за турбиной необходимо принимать меры для повышения температуры газов за турбиной. В судовых дизелях для этого чаще всего используют:

- сброс части наддувочного воздуха в атмосферу;
- байпас отработавших газов;
- регулируемый турбокомпрессор с управляемым сопловым аппаратом турбины.

Сравнительная интегральная оценка перечисленных устройств с учетом начальных вложений, эксплуатационных расходов, трудоемкости проектирования, испытаний и других факторов

показывает, что для большинства установок с одноступенчатым наддувом предпочтительным вариантом является байпас отработавших газов. Для определенного класса объектов, таких как, например, суда с винтом фиксированного шага или двигатели с двухступенчатым наддувом, достаточно перспективным вариантом представляется регулируемый ТК.

Размеры среднеоборотных двигателей позволяют встраивать без особого труда модули SCR в выпускной тракт после турбокомпрессора, чтобы не занимать лишнего места в машинном отделении. Уже в проект самого судна может быть включен бак с мочевиной и предусмотрено место для его установки. У SCR есть и другие преимущества, в частности, ее совместимость со всеми известными «внутренними» средствами оптимизации сгорания, а также возможность ее отключения при плавании в открытом море. MAN Diesel уже выпускает стандартный модуль SCR для всех среднеоборотных двигателей.

5. Рециркуляция отработавших газов

Испытания системы EGR проводились на опытном одноцилиндровом отсеке 1L32/44 CR.

Для испытаний с системой EGR отсек был доработан согласно схеме рис. 10. Двигатель имеет наддув, и при испытаниях без EGR газы направляются непосредственно в выпускную трубу через дроссельную заслонку, имитирующую давление перед турбиной в серийной машине.

При испытаниях с EGR газы отводятся из коллектора, охлаждаются, пропускаются через небольшой турбокомпрессор для повышения давления и поступают во всасывающий ресивер. Степень рециркуляции можно регулировать, изменяя расход газа через турбину турбокомпрессора EGR.

На рис. 11 показаны результаты испытаний EGR при номинальной частоте вращения при 75 %-й нагрузке. Двухступенчатый наддув демон-

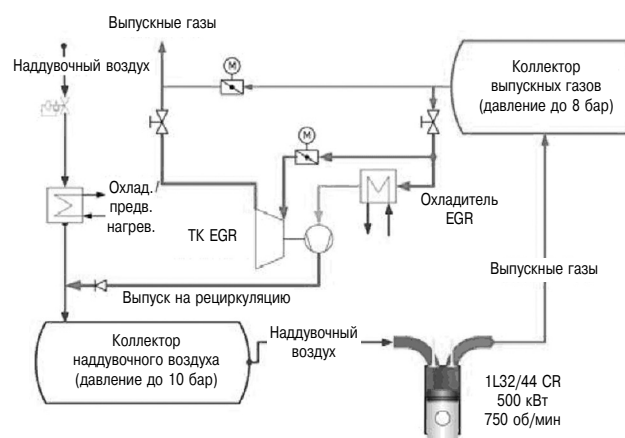


Рис. 10. Система подачи воздуха и EGR двигателя 1L32/44 CR

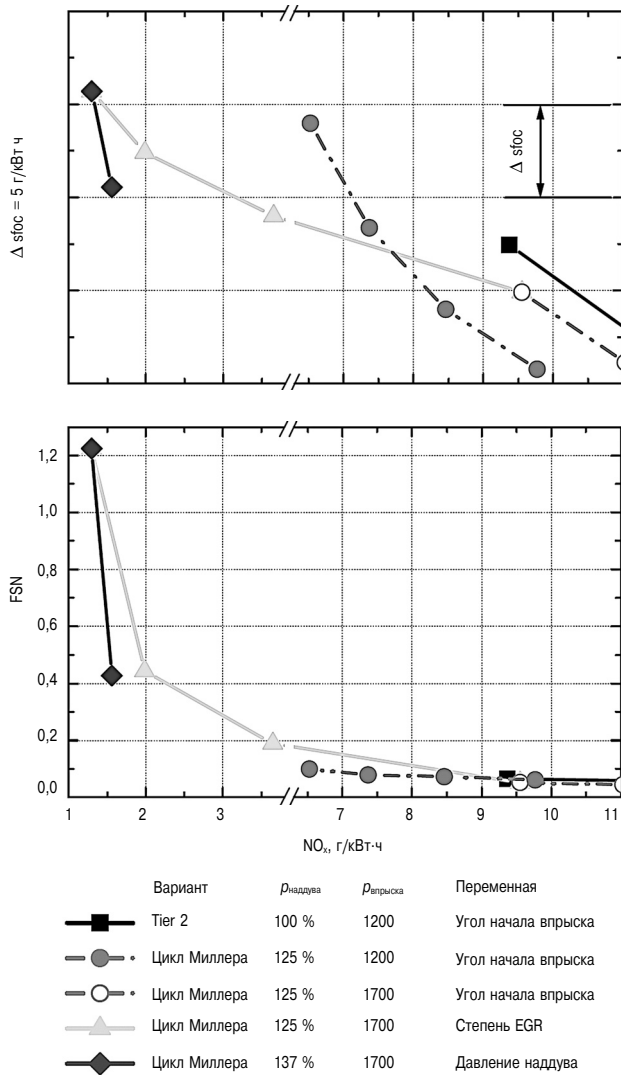


Рис. 11. Первые результаты испытаний отсека 1L32/44 CR с EGR

стрирует очевидное преимущество в смысле экономии топлива. Во избежание дымления двигателя давление впрыска в системе common rail при использовании EGR повышено до 1700 бар, что приводит к повышению расхода топлива при той же величине выбросов NO_x .

EGR позволяет снизить выбросы NO_x до уровня порядка 2 г/кВт·ч при том же давлении наддува, но заметно снижает коэффициент избытка воздуха, тем самым резко увеличивая дымление.

Повышение давления наддува на 10 % позволяет уложиться в требуемый лимит по выбросам NO_x — 2 г/кВт·ч, сохранив приемлемый уровень дымности. Послевпрыск дает возможность снизить показатель дымности еще на 20–40 % при тех же значениях выбросов NO_x и расхода топлива.

Отсюда следует, что EGR в принципе позволяет обеспечить требования Tier 3. Однако это возможно лишь при наличии:

- управляемого двухступенчатого наддува, обеспечивающего высокие значения среднего эффективного давления, а также возможности отключения EGR за пределами зон ECA;

- системы common rail, обеспечивающей сверхвысокие (до 2200 бар) значения давления впрыска и предусматривающей возможность множественных впрысков для минимизации дымления;

- повышенного давления сгорания, позволяющего поддерживать среднее эффективное давление постоянным;

- системы и теплообменника EGR, устойчивых к засорению и коррозии.

MAN Diesel продолжает углубленное изучение систем EGR среднеоборотных дизелей.

6. Что делать с серой

На содержание серы в топливе производитель двигателя повлиять не в состоянии. Концентрация окислов серы в отработавших газах зависит исключительно от ее содержания в топливе. Процесс сгорания на это никак не влияет. Тем не менее должны быть предусмотрены меры, позволяющие выполнить требования по ограничению выбросов.

Простейший способ выполнить требования по выбросу окислов серы — работа на малосернистом топливе. Это означает, что судно должно брать на борт исключительно MGO — единственный вид судового топлива, позволяющий выполнить перспективные требования. Однако перевести на MGO двигатель, рассчитанный на флотский мазут, оказывается не так-то просто. Во-первых, при переходе на топливо с более низкими показателями вязкости и смазывающей способности необходимо принять меры для защиты седел клапанов и ТНВД. Впрочем, такие меры уже разработаны и внедрены. Но самый серьезный недостаток MGO по сравнению с мазутом — это гораздо более высокая его стоимость.

Использование мазута позволяет сэкономить на стоимости топлива, но вызывает необходимость в такой системе газоочистки, которая обеспечивала бы нужную степень чистоты ОГ, не принося при этом судовладельцу убытки. В настоящее время в судовых установках применяются системы газоочистки двух видов. На некоторых судах устанавливают скрубберы — агрегаты, в которых ОГ очищаются промывкой пресной или морской водой со щелочью, например, с каустической содой. Другой возможный вариант — это реактор с гранулированным известняком, поглощающим SO_x . Эффективность обоих видов систем газоочистки составляет более 90 %. В обоих случаях для размещения самой установки и емкостей с расходными материалами требуется довольно много места.

В мокром скруббере содержащаяся в морской воде щелочь или каустическая сода используются для перевода SO_x в раствор серной кислоты и ее нейтрализации. Промывочная вода, в свою очередь, требует тщательной очистки от нефтепродуктов, частиц и других посторонних веществ. Она должна отвечать также требованиям ИМО по показателю рН. Однако в некоторых странах существует запрет на сброс промывочной воды. В системах с пресной водой количество стоков существенно ниже, что позволяет обеспечить их временное хранение. С другой стороны, для продолжительного плавания требуется большое количество реагента, который тоже надо где-то хранить. Одна из новейших концепций состоит в одновременном использовании пресной и морской воды. Такой подход, сочетая в себе преимущества обоих способов, может открыть путь к повсеместному использованию мазута даже после вступления в силу самых жестких ограничений ИМО в части SO_x . Мокрый скруббер может также быть встроен в контур EGR для очистки газов, возвращаемых во всасывающую систему двигателя. Правда, попытка сочетать мокрый скруббер с SCR, чтобы уложиться в лимиты одновременно по NO_x и SO_x , может встретить определенные трудности. Температура газа после мокрого скруббера недостаточна для нормального функционирования SCR, а высокое содержание серы в газах на входе в скруббер затрудняет организацию терморегулирования.

Возможный выход состоит в использовании системы сухой очистки с известняковыми гранулами. Такая система одинаково эффективна при любой температуре ОГ и не мешает нормальному функционированию следующей за ней системы SCR. Кроме того, благодаря высокой температуре в реакторе она может быть размещена в донной части судна, что повышает его остойчивость и не так заметно сокращает располагаемое грузовое пространство. Реактор имеет гранулированную набивку. При прохождении отработавших газов сквозь слои гранул содержащиеся в них окислы серы реагируют с набивкой, образуя гипс. Отработавшие гранулы постепенно выводятся из реактора самотеком, и могут храниться в свободных объемах корпуса судна. При этом высвобождается полезный объем, который можно использовать, например, для дополнительного размещения груза. Первые испытания таких систем на судах дали обнадеживающие результаты.

7. Может быть панацеей станет газовый двигатель?

Еще одна возможность выполнить нормативные требования ИМО сразу по NO_x и SO_x состоит в использовании природного газа. Он практически не содержит серы, а выбросы NO_x при

работе на бедных смесях оказываются существенно ниже. Это позволяет выполнить нормативные требования ИМО Tier 3 по NO_x для среднеоборотных двигателей путем их перевода на газ. Есть лишь одно препятствие — для хранения газового топлива нужно примерно в 2,5–3 раза больше места, чем для мазута. Поэтому возможности использования чисто газовых двигателей на грузовых и пассажирских судах обычного типа достаточно ограничены. Одним из вариантов разумного компромисса с учетом работы в зонах ECA и за их пределами является использование газодизельного цикла. Для снижения объема, занимаемого газовым топливом, рассматриваются варианты использования сжиженного природного газа (СПГ).

9. Заключение

Выполнена оценка различных способов выполнения требований ИМО Tier 3 по ограничению выбросов применительно к среднеоборотным двигателям MAN Diesel. Хотя существует несколько способов обеспечить выполнение требований Tier 3 по уровню выбросов, экономический анализ, учитывающий начальные вложения, стоимость расходных материалов и техобслуживания на протяжении всего срока службы показывает, что наиболее перспективными технологиями с этой точки зрения являются очистка ОГ с помощью SCR и рециркуляция отработавших газов (EGR). В качестве основного метода выполнения требований Tier 3 для среднеоборотных двигателей MAN Diesel выбрал применение SCR. Главными преимуществами данного метода являются его управляемость, надежность и высокая степень практической отработки. Предполагается, что весь ряд среднеоборотных двигателей MAN Diesel будет оборудован SCR и обеспечит соответствие требованиям Tier 3 по выбросам NO_x задолго до наступления 2016 г. Параллельно продолжается работа по доводке систем EGR на среднеоборотных двигателях. Эта система также подтвердила свою конкурентоспособность в качестве возможной альтернативы SCR с точки зрения первоначальных вложений, эксплуатационных затрат и надежности. Кроме того, MAN Diesel рассматривает возможность применения скруббера для очистки ОГ от SO_x , поскольку это единственный способ обеспечить выполнение требований ИМО Tier 3 по окислам серы при работе на мазуте в зонах SECA после 1 января 2015 г. Продолжается оптимизация существующих систем дизеля, таких, как системы турбонаддува и впрыска топлива, совершенствование процесса сгорания и электронных средств управления, чтобы в итоге создать наиболее совершенную на сегодняшний день систему.