

Отменено в связи
с потерей актуальности

РОССИЙСКИЙ МОРСКОЙ РЕГИСТР СУДОХОДСТВА

СБОРНИК НОРМАТИВНО-МЕТОДИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Книга шестнадцатая



Санкт-Петербург
2007

В настоящем Сборнике нормативно-методических материалов публикуется Процедура освидетельствования двигателей, оборудованных системами очистки газов, на соответствие техническим нормативам выбросов вредных веществ в атмосферу с судов.

Процедура подготовлена на основе научно-исследовательской работы, выполненной для Российского морского регистра судоходства ООО «НПФ «Экология» в 2006 г., и предназначена для специалистов Регистра, осуществляющих освидетельствование судовых двигателей на соответствие техническим нормативам выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух. Данная Процедура предназначена для апробации и применения в процессе освидетельствований по согласованию с Главным управлением Регистра.

Отчет по данной теме научно-исследовательской работы был утвержден на секции «Защита окружающей среды» Научно-технического совета Регистра.

В дальнейшем материалы Процедуры будут использованы при переиздании Руководства по техническому надзору за выбросами окислов азота (NO_x) при изготовлении главных и вспомогательных судовых дизелей.

СОДЕРЖАНИЕ

Процедура освидетельствования двигателей, оборудованных системами очистки газов, на соответствие техническим нормативам выбросов вредных веществ в атмосферу с судов

1 Общие положения	4
1.1 Условные обозначения и сокращения	4
2 Методы и процедуры освидетельствования систем снижения выбросов NO_x	5
2.1 Система охлаждения наддувочного (продувочного) воздуха	5
2.2 Регулируемый угол опережения подачи топлива	8
2.3 Рециркуляция отработавших газов	12
2.4 Впрыск воды и ВТЭ	16
3 Методы и процедуры освидетельствования систем очистки газов	20
3.1 Процесс селективного каталитического восстановления NO _x	20
Заключение	27

ПРОЦЕДУРА ОСВИДЕТЕЛЬСТВОВАНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ, ОБОРУДОВАННЫХ СИСТЕМАМИ ОЧИСТКИ ГАЗОВ, НА СООТВЕТСТВИЕ ТЕХНИЧЕСКИМ НОРМАТИВАМ ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРУ С СУДОВ

**Отменено в связи
с потерей актуальности**

1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1 УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящей работе приняты следующие обозначения и сокращения:

ВМТ – верхняя мертвая точка;

ВТЭ – водо-топливная эмульсия;

КПД – коэффициент полезного действия;

МАРПОЛ-73/78 – Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов 1973 г. с Протоколом 1978 г. к ней;

ПКВ – поворот коленчатого вала;

Процедура – Процедура освидетельствования двигателей, оборудованных системами очистки газов, на соответствие техническим нормативам выбросов вредных веществ в атмосферу с судов;

Регистр – Российский морской регистр судоходства;

Свидетельство EIAPP – Международное свидетельство о предотвращении загрязнения атмосферы судовым двигателем;

Технический файл – Технический паспорт выбросов судового двигателя;

ТНВД – топливный насос высокого давления;

NO_x – оксиды азота;

SCR-процесс – технология селективного каталитического восстановления NO_x аммиаком до молекулярного азота.

2 МЕТОДЫ И ПРОЦЕДУРЫ ОСВИДЕТЕЛЬСТВОВАНИЯ СИСТЕМ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ NO_x

2.1 СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ НАДДУВОЧНОГО (ПРОДУВОЧНОГО) ВОЗДУХА

2.1.1 Принцип действия.

Системы снабжения воздухом для сгорания современных дизельных двигателей, как правило, снабжены устройствами для принудительного нагнетания (наддува) воздуха в цилиндры. Наддув двигателей используется для повышения их эффективной мощности за счет повышения среднего эффективного давления при сохранении рабочего объема цилиндра и частоты вращения коленчатого вала. Увеличение массы воздуха, нагнетаемого в цилиндры под давлением, позволяет сжечь больше топлива и получить большую мощность. При этом воздух, засасываемый из атмосферы, перед подачей в цилиндры сжимается в компрессоре и разогревается тем сильнее, чем выше степень повышения давления в агрегате наддува. Независимо от способа приведения в действие компрессора (механический привод, газовая турбина, комбинированный привод) и количества ступеней наддува, конечная температура воздуха после сжатия может быть определена по формуле

$$T_k = T_a \left(1 + \frac{\pi_k^{0,286} - 1}{\eta_k} \right),$$

где π_k – степень повышения давления в компрессоре;

η_k – КПД компрессора;

T_a – температура воздуха на всасывании, °C.

Современные агрегаты наддува имеют КПД 55 – 65 %, что позволяет повысить давление наддувочного воздуха в одной ступени до 300 кПа, при этом температура сжатого воздуха после выхода из компрессора достигает 80 – 160 °C.

Таким образом, форсирование двигателя по среднему эффективному давлению за счет наддува существенно повышает общий температурный уровень процесса, а, следовательно, образование и выход NO_x с отработавшими газами.

Для повышения плотности воздушного заряда, снижения общего температурного уровня рабочего процесса дизеля и теплонапряженности

деталей цилиндро-поршневой группы используются системы охлаждения наддувочного (продувочного) воздуха.

Система охлаждения наддувочного (продувочного) воздуха является универсальной по механизму воздействия на кинетику образования вредных веществ при горении топлива в дизелях. Повышение плотности заряда способствует улучшению полноты сгорания топлива, снижению дымности отработавших газов, сокращению образования и выхода оксидов углерода и углеводородов. Образование и выход NO_x определяется максимальной температурой горения топлива, которая, в свою очередь, прямо пропорциональна температуре воздуха в начале сжатия. Следовательно, глубина охлаждения наддувочного (продувочного) воздуха прямо пропорциональна снижению выбросов NO_x .

2.1.2 Показатели функционирования.

Основным показателем нормального функционирования системы охлаждения наддувочного (продувочного) воздуха является поддержание температуры воздуха за охладителем, равной или близкой к ее референтному значению. Референтной температурой для охладителя наддувочного (продувочного) воздуха называют температуру, которую должен иметь воздушный поток за охладителем, при его расходе, соответствующем проектным показателям изготовителя для каждого режима испытательного цикла, и при температуре воды, подаваемой в охладитель, равной 25 °С.

В системах охлаждения наддувочного (продувочного) воздуха главных и вспомогательных судовых дизелей преобладают рекуперативные водо-воздушные теплообменники, в которых воздушный поток охлаждается водой внутреннего контура или непосредственно забортной водой. Особенности систем охлаждения судовых дизелей состоят в том, что температура воды внутреннего контура охлаждения, поступающая в охладитель наддувочного (продувочного) воздуха, обычно находится в пределах 20 – 35 °С, поэтому при нормальной работе теплообменника температура воздуха во впускном коллекторе должна находиться в пределах от 25 до 50 °С.

Статистическая обработка результатов испытаний по выборке, включающей более 20 модификаций малооборотных двухтактных и более 40 модификаций четырехтактных главных и вспомогательных судовых дизелей, позволила установить зависимости между изменением температуры воздуха во впускном коллекторе и относительным изменением удельных выбросов NO_x . Численные значения зависимостей вида $\Delta\text{NO}_x = f [T_{scav}]$ приведены в табл. 2.1.1.

Таблица 2.1.2

Мощность, %	Изменение величины выбросов NO_x , г/кВт·ч на 10 °С, для двигателей		
	двухтактных малооборотных	четырёхтактных среднеоборотных	четырёхтактных высокооборотных
100	0,38	0,76	0,62
75	0,30	0,52	0,44
50	0,21	0,34	0,36
25	0,18	0,20	0,21

Данные, приведенные в таблице, показывают, что некачественная работа охладителя приводит к росту выхода NO_x в среднем на 0,5 г/кВт·ч на каждые 10 °С повышения температуры наддувочного (продувочного) воздуха и возможности превышения установленных предельно допустимых технических нормативов выбросов.

2.1.3 Процедура освидетельствования.

При проведении освидетельствований двигателей методом сверки параметров необходимо идентифицировать имеющийся охладитель наддувочного (продувочного) воздуха по его фирменному шилду и проконтролировать значение температуры охлаждения наддувочного (продувочного) воздуха методом прямых измерений или по записям в судовом журнале регистрации рабочих параметров.

Отсутствие фирменного шилда на охладителе наддувочного (продувочного) воздуха не всегда может считаться достаточным условием для отказа в подтверждении действующего Свидетельства EIAPP, поскольку нормальное функционирование системы может быть подтверждено значением температуры охлаждения наддувочного (продувочного) воздуха, находящимся в разрешенном для данного двигателя диапазоне.

Температура охлаждения является одним из параметров, существенно влияющих на выбросы NO_x , поэтому ее значение, как правило, строго регламентируется указаниями соответствующего раздела Технического файла.

При проведении освидетельствований двигателя на борту судна температура охлаждения наддувочного (продувочного) воздуха должна находиться в пределах разрешенного допуска. В случае превышения предельного значения температуры охлаждения наддувочного (продувочного) воздуха результаты освидетельствования двигателя не могут быть

признаны положительными, даже если охладитель наддувочного воздуха идентифицирован по его фирменному шилду.

2.2 РЕГУЛИРУЕМЫЙ УГОЛ ОПЕРЕЖЕНИЯ ПОДАЧИ ТОПЛИВА

2.2.1 Механизм воздействия на образование и выход NO_x .

Угол опережения подачи топлива определяет закон горения топлива в цилиндре дизеля и оказывает многофакторное и существенное воздействие на кинетику образования и выхода NO_x . Особенно чувствительны к изменению угла опережения подачи топлива двигатели с объемным способом смесеобразования в открытой камере сгорания. Значение статического угла опережения подачи топлива относится к важнейшей регулировочной характеристике двигателя, определяющей показатель удельного средневзвешенного выброса NO_x . Именно по этой причине контроль угла опережения подачи топлива обязателен при всех видах освидетельствования двигателя на соответствие требованиям Приложения VI к Конвенции МАРПОЛ-73/78.

При всех видах стендовых испытаний двигателей в обязательном порядке выполняется измерение удельного эффективного расхода топлива или эффективного КПД. Известна общая закономерность вида $\frac{\text{NO}_x}{\eta_e} \rightarrow \rightarrow \text{const}$, природа которой многократно обоснована в работах многих ведущих дизелестроительных фирм.

Физическая суть этой закономерности состоит в том, что уменьшая угол опережения подачи топлива, т. е. сдвигая процесс его горения на линию расширения, можно снизить максимальную температуру в цилиндре и сократить образование и выход NO_x , но только за счет увеличения удельного эффективного расхода топлива.

Эта закономерность справедлива для режимов работы двигателя с нагрузкой, большей 50 %, и частотой вращения, большей частоты вращения, соответствующей максимальному крутящему моменту. При работе двигателя с эффективной мощностью, не выходящей за рамки указанных ограничений, уменьшение угла опережения подачи топлива сопровождается одновременным снижением удельного расхода топлива и выбросов NO_x (см. рис. 2.2.1). Таким образом, закон регулирования угла опережения подачи топлива с целью снижения выбросов NO_x должен учитывать нагрузку и частоту вращения коленчатого вала в соответствии с общими зависимостями вида $\Delta\text{NO}_x = f[\varphi_{int}]$, где $\varphi_{int} = f[p_{me}, n]$.

2.2.2 Показатели функционирования.

В общем случае с уменьшением нагрузки и частоты вращения коленчатого вала угол опережения подачи топлива должен уменьшаться. Для

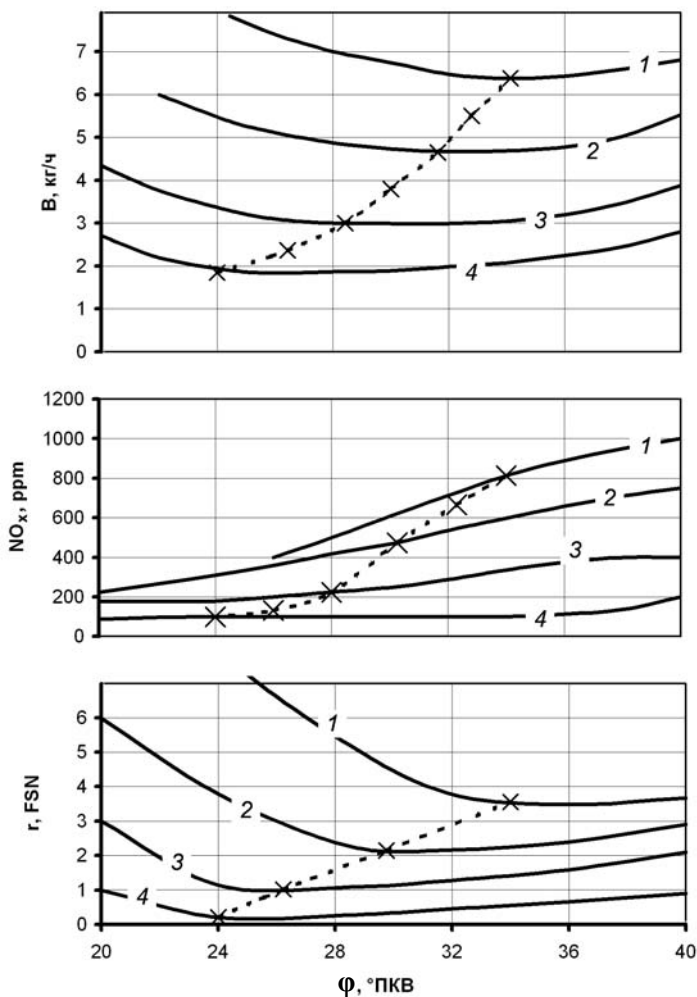


Рис. 2.2.1

Изменение показателей дизель-генератора K552 с регулируемым углом опережения подачи топлива: 1 – $P_e = 75\%$; 2 – $P_e = 50\%$; 3 – $P_e = 25\%$; 4 – $P_e = 10\%$;
 ----- закон регулирования

каждого конкретного двигателя характер этой зависимости может отличаться, однако в первом приближении положительный результат гаранти-

рует даже линейный закон регулирования. Следует отметить, что диапазон регулирования угла опережения подачи топлива обычно находится в следующих пределах:

для двухтактных малооборотных двигателей – от (5–7) до (0–2) °ПКВ до ВМТ;

для четырехтактных среднеоборотных двигателей – от (15–20) до (5–10) °ПКВ до ВМТ;

для четырехтактных высокооборотных двигателей – от (25–35) до (5–15) °ПКВ до ВМТ.

Статистическая обработка результатов испытаний выполнена по выборке, включающей 8 модификаций малооборотных двухтактных и 17 модификаций четырехтактных главных и вспомогательных судовых двигателей.

В пределах имеющихся данных установлены зависимости между изменением угла опережения подачи топлива и относительным изменением удельных выбросов NO_x . Численные значения зависимостей вида $\Delta\text{NO}_x = f[\varphi_{\text{ин}}]$, где $f[\varphi_{\text{ин}}] = f[p_{\text{ме}}, n]$, приведены в табл. 2.2.2.

Таблица 2.2.2

Мощность, %	Изменение величины выбросов NO_x , г/кВт·ч на 1 °ПКВ, для двигателей		
	двухтактных малооборотных главных (циклы E2, E3)	четырёхтактных среднеоборотных главных (циклы E2, E3)	четырёхтактных высокооборотных вспомогательных (цикл D2)
100 – 50	0,00 – 0,25	0,00 – 0,30	0,00 – 0,35
50 – 25	0,20 – 0,88	0,25 – 0,65	0,30 – 0,55
25 – 10	0,82 – 1,33	0,55 – 0,92	0,45 – 0,75
10 и менее	–	–	0,65 – 1,00

Как видно из табл. 2.2.2, снижение выбросов NO_x за счет регулирования (уменьшения) угла опережения подачи топлива получено при условии сохранения или улучшения удельного эффективного расхода топлива.

Устройства для регулирования угла опережения подачи топлива по конструкционному исполнению могут быть механическими и электронными. Механические муфты опережения подачи топлива применяются более двадцати лет, однако их возможности по диапазону и точности поддержания значений регулируемых параметров достаточно ограничены.

Так, механические муфты опережения подачи топлива, как правило, устойчиво поддерживают оптимальный закон регулирования угла опережения подачи топлива при изменении частоты вращения коленчатого вала и практически не реагируют на изменение нагрузки. Системы электронного управления процессом топливоподачи, в частности, уже получившие широкое распространение системы «Common rail», способны реализовать закон регулирования любой сложности не только по углу начала подачи, но и по закону подачи топлива.

2.2.3 Процедура освидетельствования.

При проведении освидетельствований двигателей, оснащенных механической или электронной системами регулирования угла опережения подачи топлива, необходимо идентифицировать исполнительные механизмы этой системы и проверить ее работоспособность по поддержанию закона регулирования, приведенного в технической документации изготовителя.

Для механических или гидромеханических систем регулирования наличие и идентификация по маркировке исполнительного механизма (например, регулируемой муфты привода топливного насоса высокого давления) недостаточны для положительного результата освидетельствования. Учитывая сильное влияние угла опережения подачи топлива на образование и выход NO_x , основное внимание необходимо уделить проверке воспроизведения, как минимум, статического закона регулирования по инструкции изготовителя с учетом разрешенного диапазона отклонений от ее расчетного значения. Для проведения этой проверки на борту судна должны быть необходимые инструменты и приспособления. При невозможности проведения этой проверки или при отклонениях от заданного статического закона регулирования, превышающих разрешенный диапазон допусков, результаты освидетельствования считаются отрицательными. Для подтверждения действующего Свидетельства EIAPP необходимо проведение испытаний двигателя на борту судна на соответствие действующим техническим нормативам выбросов NO_x , исключив влияние этой системы на рабочие параметры двигателя.

При освидетельствовании двигателей, оснащенных электронной системой регулирования угла опережения подачи топлива, основной контрольной процедурой считается проверка воспроизведения закона регулирования, как и в случае освидетельствования механических или гидромеханических систем. При этом закон регулирования угла опережения подачи топлива не подлежит изменению после проведения испытаний двигателя на стенде. Если система управления предусматривает возможность вмешательства оператора в закон регулирования угла опережения подачи топлива в процессе эксплуатации двигателя, то испытания

на соответствие требованиям правила 13 Приложения VI к Конвенции МАРПОЛ-73/78 необходимо проводить при максимальном и постоянном значении статического угла опережения подачи топлива, исключив его влияние на рабочие параметры двигателя.

2.3 РЕЦИРКУЛЯЦИЯ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ

2.3.1 Принцип действия.

Рециркуляция отработавших газов воздействует на образование и выход NO_x посредством влияния на механизм горения топлива в цилиндре дизеля и сокращение массообмена с окружающей средой. Оба эти фактора способствуют сокращению образования и выхода NO_x .

При рециркуляции часть воздуха, подаваемого на всасывание, замещается отработавшими газами, и эта смесь служит в качестве окислителя и рабочего тела в поршневом двигателе. Воздействие на процессы горения топлива и кинетику образования NO_x происходит за счет сокращения количества кислорода и увеличения количества инертных трехатомных газов (CO_2 , H_2O), которые изменяют термодинамические свойства рабочего тела и, в конечном итоге, снижают температуру в цилиндре. Другим преимуществом этой технологии является то, что за счет рециркуляции сокращается массообмен с атмосферой, т. е. поток отработавших газов уменьшается на то количество газов, которое возвращается в цилиндр для выполнения полезной работы в последующем рабочем цикле.

К недостаткам рециркуляции относятся трудности организации полного сгорания топлива в цилиндре при наличии большого количества углекислого газа и недостатке кислорода. Однако, этот недостаток устраняется добавками в рабочее тело необходимого количества кислорода. В то же время на режимах частичных нагрузок, при которых количество кислорода является достаточным, рециркуляция отработавших газов не вызывает повышенного выхода продуктов неполного сгорания топлива и положительно сказывается на эффективных и экологических показателях двигателя. Следовательно, увеличение количества отработавших газов в контуре рециркуляции с падением нагрузки (мощности) дизеля обеспечивает пропорциональное и весьма существенное снижение выбросов NO_x (см. рис. 2.3.1).

2.3.2 Показатели функционирования.

В общем случае количество газов, работающих в контуре рециркуляции, должно увеличиваться с уменьшением нагрузки и частоты вращения двигателя. На режимах работы с малой нагрузкой, близкой к холостому ходу, количество газов в контуре рециркуляции может достигать

Дизель 4Ч9,5/11 цилиндровой мощностью 5,0 кВт, $O_2 = 21\%$

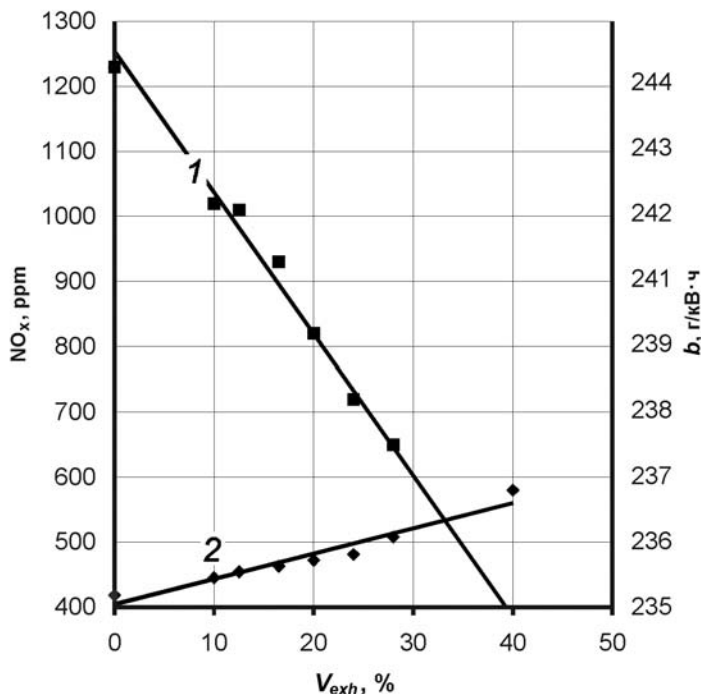


Рис. 2.3.1

Показатели малотоксичного дизеля с рециркуляцией отработавших газов, обогащенных кислородом: 1 – выход NO_x , ppm; 2 – изменение удельного расхода топлива b_e , г/кВт·ч

35 – 40 % без каких-либо негативных последствий для экономических и ресурсных показателей двигателя. Эффективность технологии рециркуляции возрастает, если газы в контуре рециркуляции охлаждаются перед подачей в цилиндры.

На режимах работы в диапазоне нагрузок от 100 до 75 % рециркуляция отработавших газов обычно не применяется, поскольку значительно ухудшает показатели экономичности.

Система рециркуляции отработавших газов в подавляющем большинстве случаев является двухпозиционной и работает в режимах

«включено» – «выключено». С появлением систем электронного управления двигателем появились управляемые устройства рециркуляции, в которых регулируемыми устройствами служат либо система клапанов (для двигателей с наддувом), либо управляемая заслонка (для двигателей без наддува).

В нерегулируемых системах количество газов в контуре рециркуляции находится в пределах от 15 до 20 %, в регулируемых – от 0 до 40 %. Закон регулирования количества газов в контуре рециркуляции должен учитывать нагрузку и частоту вращения коленчатого вала в соответствии с общими зависимостями вида $\Delta NO_x = f[G_{exh}]$, где $f[G_{exh}] = f[p_{me}, n]$.

На основании имеющихся у нас экспериментальных данных применения рециркуляции отработавших газов в четырехтактных высокооборотных и среднеоборотных двигателях можно установлены зависимости между количеством газов в контуре рециркуляции и относительным изменением удельных выбросов NO_x . Численные значения зависимостей вида $\Delta NO_x = f[G_{exh}]$, где $f[G_{exh}] = f[p_{me}, n]$, приведены в табл. 2.3.2. Приведенные в табл. 2.3.2 данные справедливы для случая реализации линейного закона увеличения количества газов в контуре рециркуляции от 0 до 35 – 40 % при снижении мощности от 100 до 0 %.

Таблица 2.3.2

Мощность, %	Изменение величины выбросов NO_x , г/кВт·ч на 10 % G_{exh} , для двигателей	
	четырёхтактных среднеоборотных главных (циклы E2, E3)	четырёхтактных высокооборотных вспомогательных (цикл D2)
100 – 50	0,00 – 0,30	0,00 – 0,20
50 – 25	0,20 – 0,55	0,15 – 0,50
25 – 10	0,30 – 0,85	0,25 – 0,75
10 и менее	0,45 – 1,25	0,40 – 1,05
Примечание. Данные о применении рециркуляции отработавших газов в малооборотных двухтактных двигателях у нас отсутствуют.		

Конструктивно система рециркуляции отработавших газов представляет собой патрубок, соединяющий выпускной и впускной коллекторы, сечение которого достаточно для перетекания необходимого количества отработавших газов из точки отбора в точку (зону) смешивания их со вса-

сываемым воздухом, с учетом располагаемого перепада давлений. Размещение устройства охлаждения газов в контуре рециркуляции и устройств определяется особенностями конструкции двигателя. Исполнительным устройством в системе рециркуляции отработавших газов служат регулирующие клапаны. Система может быть дополнена устройством смешивания газов с воздухом. Если располагаемый перепад давления недостаточен для подачи необходимого количества отработавших газов, то во впускном коллекторе необходимо устанавливать сопла и трубы Вентури.

2.3.3 Процедура освидетельствования.

При проведении освидетельствований двигателей, оснащенных системами рециркуляции отработавших газов, необходимо идентифицировать составные части этой системы и проверить ее работоспособность по реагированию исполнительных механизмов на управляющие сигналы. Для двухпозиционных систем, работающих в режимах «включено» – «выключено», этой проверки достаточно для подтверждения их работоспособности.

Поскольку в контуре рециркуляции большое количество газов способствует образованию и выходу NO_x , системы рециркуляции, реализующие заложенный изготовителем закон регулирования, необходимо освидетельствовать на воспроизведение этого закона. В силу многообразия возможных конструктивных исполнений системы рециркуляции отработавших газов метод проверки воспроизведения закона регулирования должен быть приведен в Техническом файле двигателя и в инструкции изготовителя. Для проведения этой проверки на борту судна должны находиться необходимые инструменты и приспособления. При невозможности проведения проверки или при отклонениях от заданного статического закона регулирования, превышающих разрешенный диапазон допусков, результаты освидетельствования системы считаются отрицательными. Для подтверждения действующего Свидетельства EIAAP необходимо проведение испытаний двигателя на борту судна на соответствие действующим техническим нормативам выбросов NO_x , при котором должно быть исключено влияние системы рециркуляции отработавших газов на рабочие параметры двигателя.

Приведенный выше метод освидетельствования систем рециркуляции отработавших газов применяют только в случаях, когда данная система является не отключаемой. В случаях, когда система управления двигателем предусматривает возможность ее отключения, испытания двигателя на соответствие действующим техническим нормативам выбросов NO_x и его освидетельствования в эксплуатации проводят при отключенной системе рециркуляции отработавших газов.

2.4 ВПРЫСК ВОДЫ И ВТЭ

2.4.1 Принцип действия.

Механизм воздействия на кинетику образования NO_x при горении топлива в дизеле, с точки зрения современного уровня знаний об этом процессе, таков, что практически не имеет значения, каким образом осуществляется впрыск воды в цилиндр: через отдельную форсунку, либо вместе с топливом в виде ВТЭ. Поэтому дальнейшее рассмотрение принципа воздействия на кинетику образования NO_x , определение показателей нормального функционирования и предложения по методам освидетельствования систем подачи воды в цилиндр рассмотрим на примере более распространенных систем, подающих воду в цилиндр в виде ВТЭ.

Вода, поданная в цилиндр дизеля, оказывает многофакторное воздействие на горение топлива, образование и выход как NO_x , так и других вредных компонентов. Механизм воздействия на выход NO_x разделяется на физический и кинетический. Физическое воздействие заключается в снижении температуры в зоне горения топлива за счет увеличения теплоты парообразования смеси воды и топлива. В результате этого воздействия возникает «торможение» предпламенных процессов, и основное горение смещается за ВМТ. Кинетический механизм характеризуется накоплением большого количества топлива, подготовленного к сгоранию за счет задержки самовоспламенения, и быстрым выгоранием топлива за ВМТ. Высокую скорость выгорания топлива на линии расширения поддерживает гидроксильная группа OH , образующаяся за счет диссоциации воды, впрыснутой с топливом, однако вследствие расширения температура горения ниже, чем в обычном процессе, поэтому скорость образования NO_x снижается.

Опыт практических исследований показал, что использование ВТЭ в дизелях обладает следующими особенностями в сравнении со стандартным углеводородным топливом:

энергетический баланс процессов диссоциации воды, а затем окисления продуктов диссоциации, приближается к нулю, и на улучшение экологичности заметно повлиять в принципе не может;

при работе двигателя на ВТЭ за счет участия продуктов диссоциации воды в горении топлива улучшается полнота его сгорания, вследствие чего в 2 – 3 раза снижается дымность отработавших газов;

за счет снижения температуры горения образование и выход NO_x сокращается на 30 – 50 % при содержании воды в топливе 15 – 40 %, соответственно.

Все вышеперечисленные преимущества ВТЭ, в особенности улучшение экологических показателей дизеля, удается полностью реализовать только в том случае, если состав ВТЭ переменный: максимальное содержание воды на высоких нагрузках и полное отсутствие воды на нагрузках менее 20 – 30 % от номинальной. В противном случае при работе дизеля с малой нагрузкой и на холостом ходу вместо положительного эффекта наблюдается повышенное задымление, большое количество выбросов СО и СН, а также неустойчивая работа вследствие переохлаждения.

Поскольку ВТЭ на основе дизельного топлива требуют дополнительного введения в состав топлива или воды стабилизирующих присадок (эмульгаторов), а моторное топливо и мазуты содержат в своем составе эмульгаторы, ВТЭ на основе тяжелых топлив являются более стабильными.

Существует еще одно свойство ВТЭ как моторного топлива, ограничивающее область ее применения: узкий температурный диапазон существования смеси топлива и воды в виде эмульсии. Сильное увеличение вязкости ВТЭ с понижением температуры приводит к тому, что при температурах, близких к 0 °С, эмульсия практически не прокачивается через топливную систему двигателя, а при температуре –5 °С и вовсе замерзает. При нагревании выше 60 °С ВТЭ, даже содержащая мощные эмульгаторы, быстро расслаивается на воду и исходное топливо. Другими словами, ВТЭ можно применять только при изменении температуры в интервале от +40 до +10 °С, т. е. в обитаемых помещениях, машинных отделениях судов, под землей и т. п. С учетом этих свойств ВТЭ на основе тяжелых сортов топлива используются в основном на флоте.

2.4.2 Показатели функционирования.

Топливная система двигателей с ВТЭ работает в двух режимах: «работа на ВТЭ» – «работа на топливе». Наиболее распространены системы, обеспечивающие работу на ВТЭ постоянного состава. В нерегулируемых системах количество воды в эмульсии постоянно и находится в пределах от 15 до 20 %.

Более эффективны системы ВТЭ, готовящие и подающие эмульсию переменного состава. Максимальное количество воды (35 – 45 % от цикловой подачи топлива) подается на режиме полной мощности. Подача воды должна полностью отключаться при нагрузке менее 30 % от номинального значения. Закон регулирования количества воды в ВТЭ должен учитывать нагрузку и частоту вращения коленчатого вала. Наиболее распространенный закон регулирования – линейный.

Общий характер изменения выбросов главного судового дизеля при использовании ВТЭ оптимального переменного состава показан на рис. 2.3.2. Работа дизеля на ВТЭ дизельного топлива с оптимальным со-

держанием воды на режимах винтовой характеристики позволяет снизить удельный расход топлива на примерно на 2 – 3 г/кВт·ч, концентрацию NO_x и оксидов углерода – на 40 %, дымность (по сажеосодержанию) – почти в 6 раз при незначительном (до 0,5 МПа) возрастании максимального давления сгорания. Во всех случаях использования ВТЭ в малооборотных двухтактных дизелях отмечалось повышение удельного эффективного расхода топлива на 1 – 3 %.

На основании экспериментальных данных по эффективности применения ВТЭ в двухтактных малооборотных, четырехтактных высокооборотных и среднеоборотных двигателях установлены общие зависимости между количеством воды в эмульсии и относительным изменением удельных выбросов NO_x . Данные получены на основании статистической обработки результатов испытаний, по выборке, включающей 4 модификации малооборотных двухтактных и более 20 модификаций четырехтактных главных и вспомогательных судовых дизелей.

Численные значения общих зависимостей вида $\Delta \text{NO}_x = f[G_{\text{H}_2\text{O}}]$, где $G_{\text{H}_2\text{O}} = f[p_{\text{ме}}, n]$, приведены в табл. 2.4.2. Данные, приведенные в таблице, справедливы для случая реализации линейного закона изменения содержания воды в ВТЭ от 0 до 35 – 40 % при увеличении мощности дизеля от 25 до 100 %.

Таблица 2.4.2

Мощность, %	Изменение величины выбросов NO_x , г/кВт·ч на 5 % H_2O , для двигателей		
	двухтактных малооборотных главных (циклы E2, E3)	четырехтактных среднеоборотных главных (циклы E2, E3)	четырехтактных высокооборотных вспомогательных (цикл D2)
100 – 75	0,25	0,35	0,55
75 – 50	0,12	0,25	0,35
50 – 25	0,05	0,15	0,20

Двигатели, использующие ВТЭ в качестве моторного топлива, имеют следующие дополнительные компоненты и конструктивные особенности:

- расходный бак с водой;
- расходный бак с эмульгатором (только для дизельного топлива);
- устройство для приготовления ВТЭ (диспергатор);

ТНВД с увеличенной цикловой подачей для возможности подачи топлива в смеси с нейтральной водой;

систему дозировки и регулирования концентрации воды в эмульсии;
систему дозировки и регулирования стабилизатора (только для дизельного топлива).

В случае применения заранее приготовленной ВТЭ необходима система поддержания ее стабильного состояния в топливном баке и переключения питания на бак с чистым топливом при низких нагрузках, при пуске и перед остановкой. Во всех случаях применения ВТЭ дизель должен быть двухтопливным. Чистое топливо используется для пуска, работы на холостом ходу и малых нагрузках и для промывки топливной системы перед остановкой двигателя. ВТЭ используется при работе на основных технологических режимах работы под нагрузкой.

2.4.3 Процедура освидетельствования.

При проведении освидетельствований двигателей, оснащенных системами подачи в цилиндр ВТЭ, необходимо идентифицировать составные части этой системы. Практика освидетельствования систем, имеющих сложную структуру, функционирование которых предполагает наличие и управление дозировкой дополнительных реагентов (в данном случае воды и эмульгаторов), сложный алгоритм и систему управления, подтверждает необходимость разработки Технического файла на эту систему.

Технический файл на сложные системы снижения выбросов двигателей по своей структуре и содержанию должен быть аналогичным Техническому файлу двигателя и иметь соответствующие разделы, описывающие компоненты, регулирования и рабочие параметры этой системы, а также процедуру ее освидетельствования в эксплуатации.

В случае освидетельствования системы приготовления и подачи ВТЭ необходимо идентифицировать ее компоненты, выполнить проверку алгоритма и закона регулирования подачи воды и реагента и проконтролировать исполнение этого алгоритма в условиях эксплуатации.

Если Технический файл двигателя декларирует наличие системы ВТЭ, данная система должна быть не отключаемой. Это означает, что если система предусматривает начало подачи ВТЭ вместо топлива при достижении нагрузки дизеля, равной 30 %, то подача воды должна начинаться в каждом случае достижения этой нагрузки.

Проверка реализации закона регулирования системы ВТЭ должна выполняться по методике разработчика этой системы, а также дополнительно контролироваться по показателям расхода воды и реагента в этой системе. Например, если главный двигатель мощностью 1000 кВт в режиме крейсерского хода имеет суточный расход топлива, равный 6 т, то при наличии системы ВТЭ должен быть зафиксирован расход воды, равный 2,4 т.

При невозможности проведения проверки алгоритма и закона регулирования, при отклонениях от заданного статического закона регулирования (по отклонению от расчетного расхода воды), а также при отсутствии регистрации расхода воды результаты освидетельствования системы считаются отрицательными. Для подтверждения действующего Свидетельства EIAPP необходимо проведение испытаний двигателя на борту судна на соответствие действующим техническим нормативам выбросов NO_x , исключив влияние системы приготовления и подачи ВТЭ на рабочие параметры двигателя.

В случаях, когда система управления двигателем предусматривает возможность произвольного отключения системы ВТЭ, испытания двигателя на соответствие действующим техническим нормативам выбросов NO_x и его освидетельствования в эксплуатации должны выполняться при отключенной системе ВТЭ. Отключаемая система не может декларироваться как система снижения выбросов NO_x в Техническом файле двигателя.

3 МЕТОДЫ И ПРОЦЕДУРЫ ОСВИДЕТЕЛЬСТВОВАНИЯ СИСТЕМ ОЧИСТКИ ГАЗОВ

3.1 ПРОЦЕСС СЕЛЕКТИВНОГО КАТАЛИТИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ NO_x

3.1.1 Принцип действия.

Современный уровень развития техники располагает весьма ограниченным арсеналом средств очистки отработавших газов дизелей от NO_x после выпуска их из цилиндра. Одной из немногих безотходных промышленно освоенных технологий уже более 10 лет остается технология SCR-процесса.

В настоящем разделе кратко описываются особенности SCR-процесса, которые необходимо учитывать при проведении освидетельствования оборудования для очистки газов, установленного на борту судна. Техническая документация изготовителя на технологию и оборудование должна содержать описание:

- физико-химических основ процесса или технологии;
- показателей функционирования и конструкции устройства;
- применяемых реагентов, материалов, катализаторов и технологии их изготовления;

метода освидетельствования.

Технология SCR-процесса, несмотря на известные ее недостатки, активно внедряется в Северной Европе, в основном в скандинавских странах, датской фирмой «Haldor Topsøe». Это оборудование уже установлено на нескольких десятках паромов и круизных лайнеров, эксплуатируемых в Балтийском море, и используется в составе не менее чем 40 дизельных тепловых электростанций. Другими центрами активного внедрения этой технологии являются США (штат Калифорния, фирма «Engelhard») и Япония.

SCR-процесс осуществляется с загруженными титан-ванадиевыми катализаторами при температуре 330 – 420 °С по следующим реакциям:



Обе реакции протекают независимо друг от друга, кроме того, NO_x и аммиак в присутствии катализатора реагируют между собой следующим образом:



Главным аргументом оппонентов применения этой технологии является опасность хранения газообразного аммиака. Однако, эта проблема успешно решается заменой газообразного аммиака на водный раствор мочевины, к хранению которого не предъявляется каких-либо специальных требований. В зоне реакции аммиак образуется при разложении водного раствора мочевины следующим образом:



Особенностью SCR-процесса является низкая объемная скорость восстановления NO_x (не более $1,2 \times 10^4$), вследствие чего наличие SCR-реактора значительно увеличивает габариты и массу энергетической установки в целом. При указанных скоростях процесса восстановления NO_x объем катализатора, загруженного в реактор, ориентировочно равен 0,7 м³ на 1,0 МВт мощности энергетической установки. В качестве примера, дающего возможность сопоставить габариты главного судового дизеля и SCR-реактора, на рис. 3.1.1 приведен чертеж корпуса судна, энергетическая установка которого снабжена установкой снижения выбросов NO_x .

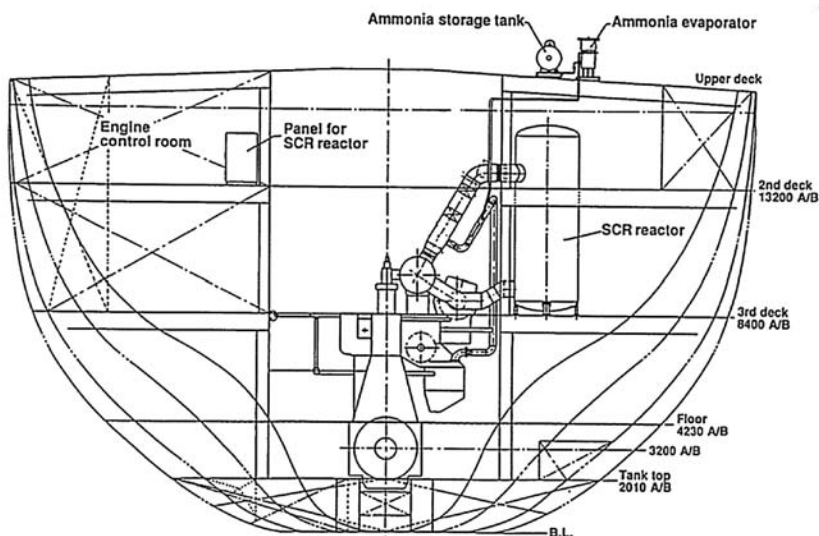


Рис. 3.1.1
Главный судовой дизель с SCR-реактором

3.1.2 Показатели функционирования и описание конструкции.

Двигатели, на которых применяется технология SCR-процесса, имеют следующие дополнительные компоненты и конструктивные особенности:

- бак для хранения восстанавливающего реагента (водного раствора мочевины);

- SCR-реактор с загруженным катализатором;

- систему контроля выбросов NO_x (определение содержания NO_x в отработавших газах);

- систему дозирования восстанавливающего реагента (аммиака) в количестве, обеспечивающем стехиометрическое соотношение реагентов в реакции восстановления (3.1.1-1);

- систему контроля температурного порога реакции (300 – 450 °C);

- систему управления SCR-процессом.

При проведении освидетельствования системы очистки газов с SCR-реактором необходимо контролировать расход и оценить минимальный запас восстанавливающего реагента. Для контрольного расчета воспользуемся брутто-реакцией (3.1.1-1) и статистическими данными по ко-

личеству NO_x , образующихся при сжигании килограмма (тонны) топлива в эксплуатируемых судовых дизелях. Полученные нами на основании прямых измерений статистические данные приведены на рис. 3.1.2-1 и 3.1.2-2, соответственно.

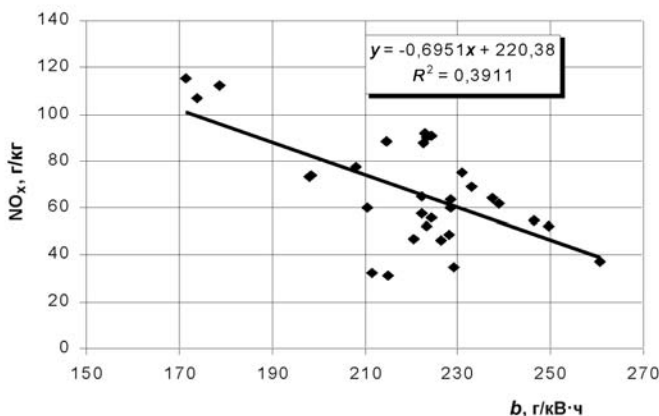


Рис. 3.1.2-1
Удельные средневзвешенные (по топливу) выбросы NO_x
вспомогательных судовых двигателей (циклы E2, E3)
в зависимости от удельного среднеексплуатационного расхода топлива

В соответствии с брутто-реакцией (3.1.1-1) на восстановление 140 кг NO_x необходимо 68 кг аммиака, что примерно равно соотношению 1 : 0,5.

Например, известно, что главный судовой дизель имеет максимальную длительную мощность 4000 кВт, мощность при крейсерской скорости судна, равную 3000 кВт, и удельный среднеексплуатационный расход топлива, равный 215 г/кВт·ч. Для этого двигателя удельный (по топливу) выброс NO_x (см. рис. 3.1.2-1) составляет 70 г/кг (кг/т) или 45,6 г/кг (кг/т) NO_x . Необходимо иметь в виду, что в потоке отработавших газов, после выпуска их из цилиндра, содержится только NO_x , в то время как для расчета технических нормативов выбросов принимается, что NO_x полностью окислились в NO_2 . Тогда при сжигании трехнедельного запаса топлива, равного 300 т, выделится $0,0456 \times 300 = 13,7$ т NO_x , на восстановление которых потребуется $13,7 \times 0,5 = 6,85$ т аммиака.

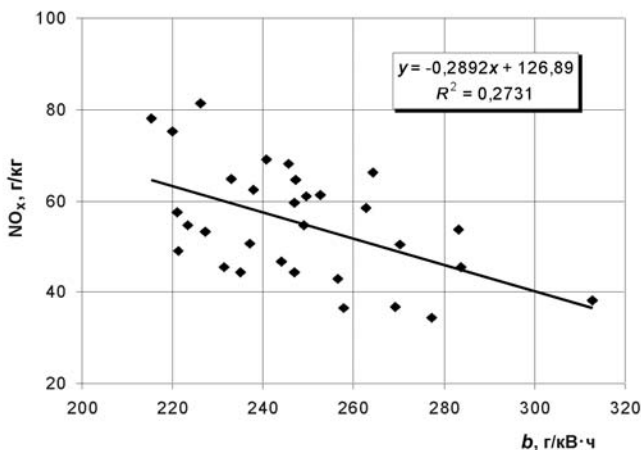


Рис. 3.1.2-2

Удельные средневзвешенные (по топливу) выбросы NO_x вспомогательных судовых двигателей (циклы D2, C1) в зависимости от удельного среднеэксплуатационного расхода топлива

Согласно брутто-реакции (3.1.1-4), из 60 кг мочевины образуется 34 кг аммиака, из чего следует, что необходимый запас мочевины, соответствующий запасу топлива, должен составлять $6,85 \times 60/34 = 12,01$ т.

Приведенные расчеты имеют целью показать, что в рассмотренном примере расход восстанавливающего реагента должен составлять примерно 4 % от расхода топлива двигателем, а его запас, соответственно, не менее 4 % от запаса топлива.

Из универсальной характеристики SCR-реактора следует, что для достижения полноты реакции и исключения «проскока» аммиака система управления работой реактора должна начинать подачу восстанавливающего реагента только после разогрева катализатора до температуры, большей 300°C , и прекращать его подачу после того, как катализатор остынет ниже этой температуры. Чем ниже температура катализатора (см. рис. 3.1.2-3), тем ниже эффективность процесса восстановления NO_x , и тем большее количество не вступившего в реакцию восстановления аммиака за счет «проскока» выбрасывается в атмосферу.

Важнейшей характеристикой титан-ванадиевого катализатора, загружаемого в SCR-реактор, является ресурс его работы.

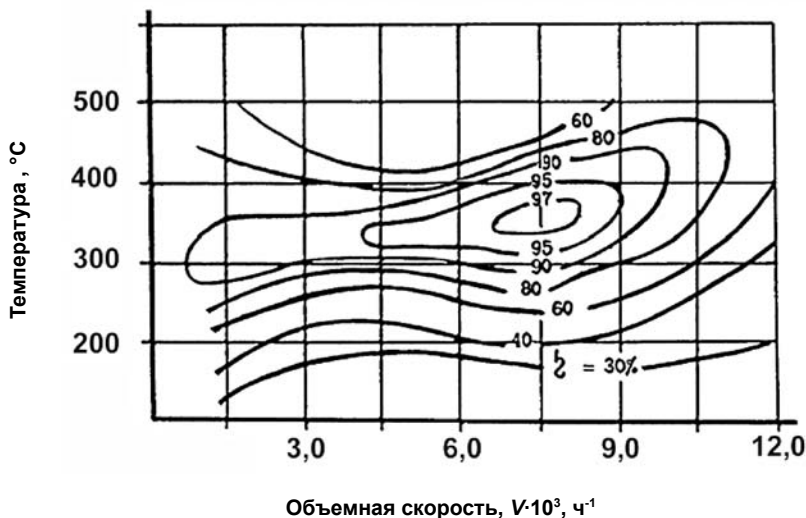


Рис. 3.1.2-3
Универсальная характеристика опытного SCR-реактора

Если активность катализатора снижается на 30 % по сравнению с активностью свежего катализатора, то катализатор считается выработавшим свой ресурс. О снижении активности катализатора судят по снижению эффективности процесса восстановления NO_x . Если в контрольной точке температурного режима реактора, равной 400 °С, и в контрольной точке, соответствующей его максимальной эффективности, ее значение снижается с 95 до 65 %, то катализатор считается выработавшим свой ресурс.

Для катализаторов, выпускаемых фирмами «Haldor Topsoe» (Дания) и «Engelhard» (США), декларируется ресурс работы, равный 10 000 ч. Вероятно, этот ресурс может быть достигнут при использовании в двигателе малосернистых топлив прямой перегонки. При наличии серы в топливе в количестве, превышающем 0,2 %, ресурс катализатора снижается вдвое вследствие негативного воздействия серы.

3.1.3 Процедура освидетельствования.

Если Технический файл двигателя декларирует наличие системы очистки газов, реализующей SCR-технологии, то данная система должна быть не отключаемой. Это означает, что выпуск отработавших газов в атмосферу должен быть организован только через реактор очистки газов,

при этом обводящие трубопроводы и магистрали запрещены. Система управления работой реактора должна обеспечивать начало подачи восстанавливающего реагента в каждом случае достижения рабочей температуры катализатора, за исключением аварийных ситуаций, предусмотренных алгоритмом управления.

На оборудование для очистки газов, реализующее SCR-технологию, должен быть разработан Технический файл, содержащий сведения о компонентах, настройках и рабочих параметрах системы, а также процедуру освидетельствования системы, подтверждающую ее функционирование в штатном режиме.

При освидетельствовании двигателей, оснащенных оборудованием для очистки газов, должен осуществляться документальный и инструментальный контроль.

В процессе документального контроля необходимо идентифицировать компоненты системы, определяющие ее технические характеристики и работоспособность, в частности:

- тип, марку и техническую характеристику реактора;
- тип, состав и характеристику загруженного катализатора;
- тип и характеристику системы дозирования восстанавливающего реагента;
- марку и состав восстанавливающего реагента.

При освидетельствовании настроек и рабочих параметров системы очистки газов необходимо выполнить проверку алгоритма управления ее работой в отношении обеспечения пропорциональности расхода восстанавливающего реагента потоку выбросов NO_x с отработавшими газами, при соблюдении стехиометрического соотношения реагентов в реакции (3.1.1-1).

Как уже было показано ранее, для очистки газов по SCR-технологии проверка соблюдения закона пропорциональности между расходом восстанавливающего реагента и потоком выбросов NO_x должна выполняться по методике разработчика этой системы в связи со сложностью, а в ряде случаев и невозможностью воспроизведения отклика исполнительных устройств на управляющие сигналы системы при неработающем двигателе.

Дополнительным подтверждением нормальной работы системы на борту судна в штатном режиме могут служить данные о расходе восстанавливающего реагента, пропорциональном расходу топлива, и его запаса, соответствующем запасу топлива.

Система управления технологическим процессом очистки газов должна контролировать ресурс работы катализаторов с целью их своевременной замены и сдачи на утилизацию.

При невозможности проверки корректности алгоритма управления технологическим процессом очистки газов, при несоблюдении пропорциональности между дозировкой восстанавливающего реагента и потоком выбросов NO_x , при возникновении «проскока» аммиака, а также при снижении активности катализатора результаты освидетельствования системы считаются отрицательными.

В подобных случаях для подтверждения действующего Свидетельства EIAPP необходимо проведение испытаний двигателя на борту судна на соответствие действующим техническим нормативам выбросов NO_x , при которых должно быть исключено влияние системы приготовления и подачи ВТЭ на рабочие параметры двигателя.

Если в системе выпуска отработавших газов дизеля находятся обводящие реактор трубопроводы, система управления двигателем должна предусматривать возможность произвольного отключения оборудования для очистки газов. В этом случае испытания двигателя на соответствие действующим техническим нормативам выбросов NO_x и его освидетельствования в эксплуатации должны выполняться при отключенной системе рециркуляции отработавших газов. Отключаемая система не может декларироваться как штатная система снижения выбросов NO_x в Техническом файле двигателя.

Настоящая Процедура содержит рекомендации по проверке только принципиальных моментов, подтверждающих работу системы очистки газов в штатном режиме. Технический файл на комплект оборудования для очистки газов, разработанный изготовителем и одобренный Регистром, должен содержать полный перечень браковочных показателей, подлежащих проверке в процессе освидетельствования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные методы освидетельствования двигателей, оснащенных системами снижения выбросов и устройствами очистки газов, показали, что они не являются универсальными, поскольку должны быть основаны на знании конструктивных особенностей и особенностей функционирования этих систем.

Системы, имеющие сложную структуру, работа которых предполагает применение дополнительных реагентов, наличие алгоритмов и систем управления, должны быть освидетельствованы. Процедура их освидетельствования, как и в случае освидетельствования двигателя, должна

предусматривать разработку и одобрение Технического файла, содержащего описание методов и приемов освидетельствования нормального функционирования этих системы в эксплуатации. Разработка и одобрение Технического файла на систему снижения выбросов или систему очистки газов принципиально не будет отличаться от аналогичной процедуры, предусматривающей разработку и одобрение Технического файла на двигатель.

Системы снижения выбросов и устройства очистки газов, как правило, являются управляемыми. При этом алгоритмы управления разрабатываются под конкретную технологию и оборудование. Освидетельствование программ и алгоритмов управления представляет наиболее сложную часть процедуры контроля нормального функционирования оборудования на борту судна, поскольку программы скомпилированы, а алгоритмы не раскрываются разработчиками в технической документации. Данную часть освидетельствования целесообразно выполнять по реакции исполнительных устройств на управляющие сигналы, а также косвенными балансовыми методами (например, по расходу воды в случае использования ВТЭ или по расходу восстанавливающего реагента в случае использования системы очистки газов, реализующей SCR-процесс, как это показано в соответствующих разделах настоящей Процедуры).

При проведении освидетельствований двигателей, оборудованных системами снижения выбросов вредных веществ или оборудованием для очистки газов, необходимо придерживаться следующих принципиальных моментов:

1 если Технический файл двигателя декларирует наличие системы снижения выбросов вредных веществ или оборудования для очистки газов, данная система должна быть не отключаемой. Это означает, что установленные система или оборудование должны начинать работать по заданному алгоритму при достижении установленного порогового значения одного или группы рабочих параметров двигателя, за исключением аварийных ситуаций;

2 в случаях, когда система снижения выбросов или оборудования для очистки газов установлена, но система управления двигателем предусматривает возможность их произвольного отключения оператором, испытания двигателя на соответствие действующим техническим нормативам выбросов NO_x и его освидетельствования в эксплуатации должны выполняться при отключенном оборудовании. Другими словами, отключаемая система или оборудование не могут декларироваться как система двигателя, предназначенная для снижения выбросов NO_x .

Российский морской регистр судоходства

СБОРНИК НОРМАТИВНО-МЕТОДИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Книга шестнадцатая

Редакционная коллегия Российского морского регистра судоходства

Ответственный за выпуск *Е. Б. Мюллер*

Главный редактор *М. Ф. Ковзова*

Редактор *Е. Н. Сапожникова*

Компьютерная верстка *Д. Г. Иванова*

Подписано в печать 10.01.07. Формат 60 × 84/16. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л.: 1,6. Уч.-изд. л.: 1,5. Тираж 200. Заказ 2296.

Российский морской регистр судоходства

191186, Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, 8