

Федеральное государственное казенное  
профессиональное образовательное учреждение  
«Ломоносовский морской колледж Военно-Морского Флота»  
Министерства обороны Российской Федерации

Рассмотрено и одобрено:  
на заседании ПМК  
судомеханического цикла  
Протокол № 6  
от 19.01 2023 г.  
Председатель ПМК

  
(подпись)

Утверждаю  
Начальник цикла СМЦ Никольская Е.Ю.

  
(подпись)

\_\_\_\_\_ 2023 г.

МДК 01.01. «Основы эксплуатации, технического обслуживания и ремонта  
судового энергетического оборудования»  
Раздел: «Судовые двигатели внутреннего сгорания»

Обеспечение безопасной эксплуатации СЭУ.

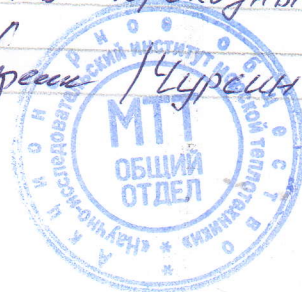
Требование к судовым дизелям по ограничению выбросов окислов азота.

*В данной работе автор дал глубокий анализ причин и были сделаны выводы по обеспечению безопасности эксплуатации СЭУ. Так же глубоко рассмотрены вопросы по охране окружающей среды. Работа может быть использована для обучения курсантов судомехаников мореходных училищ.*

*Зам. главного конструктора АО «НИИ морсепмотехники»*

Автор: преподаватель цикла СМЦ

Филюшкин Е.А.



# ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СЭУ

## Технические аспекты безопасности СЭУ при маневрировании судна

Безопасность маневрирования судна при следовании в узкостях по сложному форватору, при подходах к порту и швартовке, в ледовых условиях в определенной степени зависит от маневренных качеств пропульсивного комплекса. Наиболее категорично эти связи прослеживаются в СЭУ с непосредственной передачей мощности на винт фиксированного шага (ВФШ), когда возможность маневра судна всецело зависит от пусковых и реверсивных качеств главного двигателя и безопасного уровня скорости самого малого хода. Поэтому в формулировании категорий опасностей при маневрировании судна прежде всего следует обратить внимание на отказы выполнения команд пуска и реверса (рис.1).

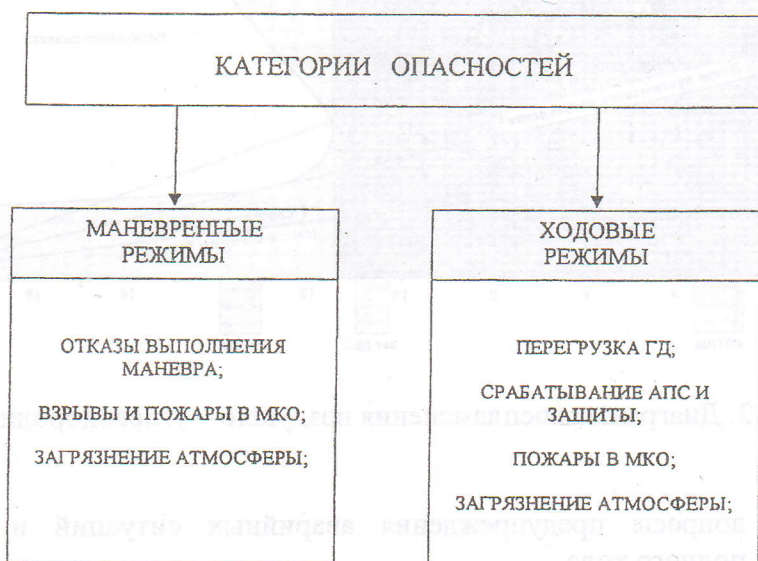


Рис. 1. Технические и управленческие аспекты обеспечения безопасности маневренных и ходовых режимов работы судов

Другие категории опасностей, как-то пожары и взрывы в газовыпускных трактах и утилизационных котлах являются следствием работы двигателей при малых нагрузках. Режимы малого хода характеризуются низкотемпературным выпуском газов и, как следствие, при длительной работе сопровождаются интенсивным загрязнением двигателя, системы газовыпуска и утилизационного котла частицами отработавшего масла и неполного сгорания топлива. Их возгорание и взрывы смеси паров углеводородов СН и воздуха (рис.2) могут существенно затруднить проведение маневра, привести к аварии двигателя или его остановке.

К категории опасностей можно отнести и встречающиеся иногда явления сильного дымления двигателя при пуске и режимах самого малого хода. Загрязнения атмосферы продуктами неполного сгорания топлива особенно в акваториях порта расцениваются как экологическая опасность и могут сопровождаться штрафными санкциями.

Наконец, частые и динамичные теплосмены на переменных ходах способствуют повреждению деталей камеры сгорания (появлению трещин) вследствие быстрого нагрева и охлаждения. Такого рода технологические опасности характерны для двигателей, работающих в тяжелых условиях маневрирования судна во льдах.



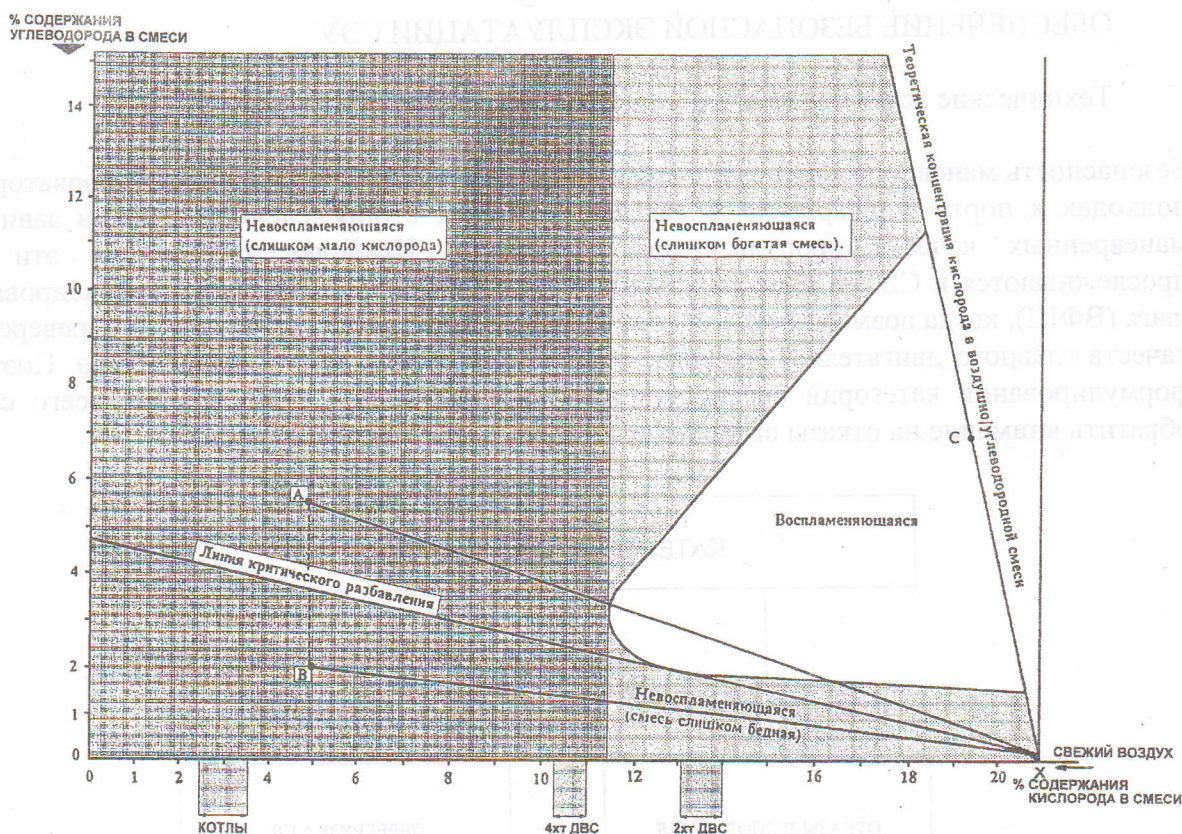


Рис. 2. Диаграмма воспламенения воздушно – углеводородной смеси

Ключевые вопросы предупреждения аварийных ситуаций в эксплуатации СЭУ на режимах полного хода

Управление безопасностью СЭУ на режимах полного хода в большой степени зависит от назначаемой нагрузки главных двигателей. Форсирование скорости и мощности, не связанные с критическими обстоятельствами для судна, довольно часто встречается на практике и являет серьезной причиной снижения надежности. Поэтому в вопросах предупреждения аварийных ситуаций в эксплуатации и при планировании рейсов основополагающее значение имеет выбор рационального нагружения главных двигателей, в том числе и при воздействии внешних факторов на сопротивление движению судна.

В отличие от кратковременных маневренных режимов здесь мы имеем дело с повышенными нагрузками и длительными условиями работы в диапазоне мощностей 50 – 100 %.

По паспортным данным работа двигателя на номинальной 100 %-ной мощности не ограничивается во времени. Но из соображений реальной эксплуатации судна длительные режимы полного хода обычно назначаются при мощности 75 – 85 %. Но и на этих уровнях нагрузки в тяжелых условиях плавания (в штормовую погоду, при движении во льдах, на мелководье, при обрастании корпуса) во избежание перегрузки приходится вводить ограничения подачи топлива и частоты вращения в соответствии с ограничительными характеристиками двигателя.

Вследствие особенностей рабочих процессов двигателей и на основании опыта эти ограничения устанавливаются в виде линейной характеристики изменения крутящего момента  $M_e$  в зависимости от частоты вращения  $n$  с незначительной коррекцией  $M_e = \text{const}$  на участке  $n = 96 - 105 \%$  (рис.3).



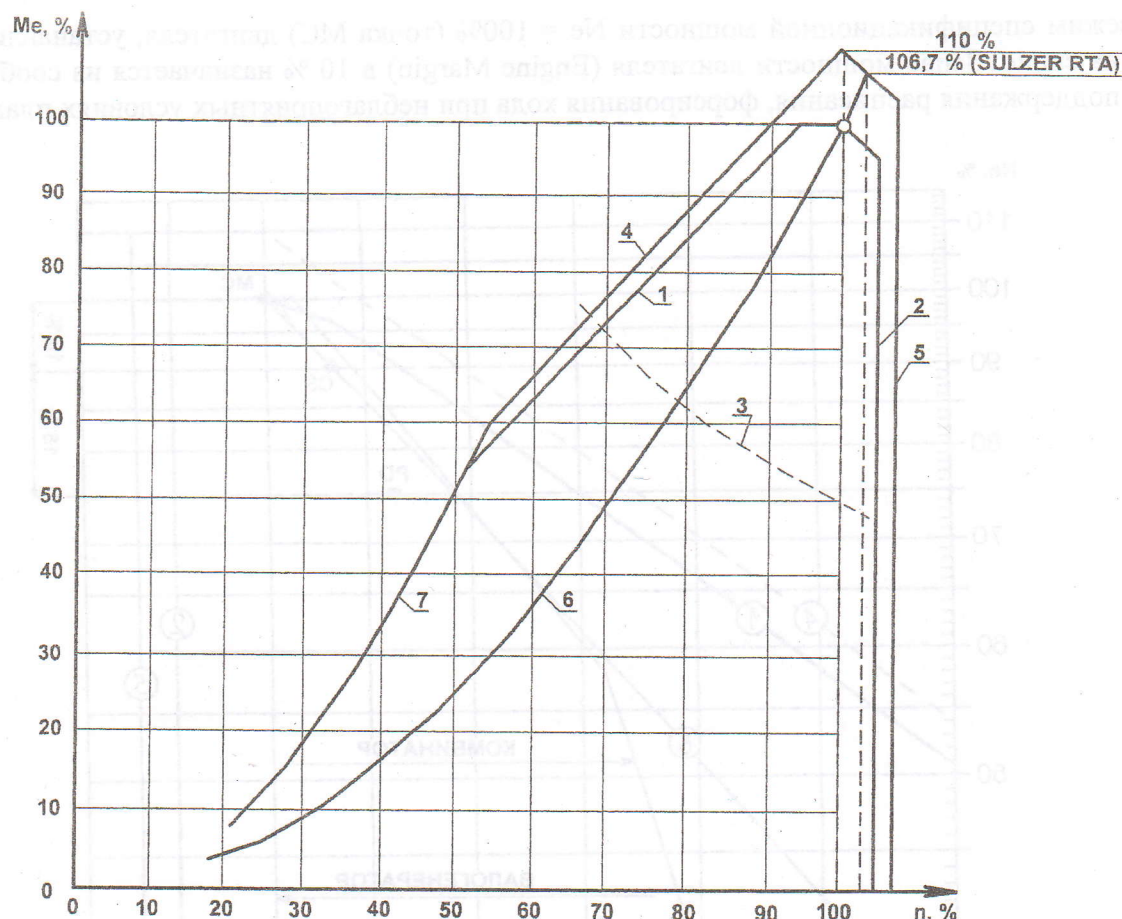


Рис. 3. Схема построения ограничительных характеристик дизелей MAN B & W MC и SULZER RTA

- 1, 4 – Рабочее и предельное ограничение момента
- 3 – Ограничение мощности полного хода (50 %)
- 2, 5 – Ограничение частоты вращения (105 и 107 %)
- 6 – Базовая винтовая характеристика
- 7 – Винтовая характеристика на швартовах

Таким образом, возможности нагружения двигателей на режимах полного хода ограничиваются значениями момента  $M_{огр}$  по линии 1, частоты вращения  $n_{огр} = 105\%$ , линии 2 и снизу линией 3 мощности  $N_e = 50\%$  (рис.3). Рассмотренная схема ограничений принята ведущими дизелестроительными фирмами. Она дополняется линиями 4 и 5 предельного ограничения момента и частоты вращения, а также теоретической винтовой характеристикой 6 ( $M_e \sim n^2$ ) и при работе на швартовах 7.

Для двигателей MAN B & W типа MC диаграмма нагрузки в логарифмических координатах мощности и частоты вращения показана на рисунке 4.

В таком виде диаграмма нагрузки используется при назначении параметров спецификационных режимов и запасов мощности двигателя, устанавливаемого на судно.

Спецификационными режимами являются:

- режим проектной мощности  $N_e = 75\%$  для расчета параметров гребного винта, удовлетворяющих контрактной (проектной) скорости судна  $V_k$  при чистом новом корпусе с полной осадкой (точка PD, рис.4);
- режим эксплуатационной мощности  $N_e = 90\%$  (точка CS), при котором учитывается влияние обрастания корпуса и для выполнения контрактной скорости требуется 15 % увеличение мощности (морской запас Sea Margin);



- режим спецификационной мощности  $N_e = 100\%$  (точка MC) двигателя, устанавливаемого на судно. Запас мощности двигателя (Engine Margin) в 10 % назначается из соображений поддержания расписания, форсирования хода при неблагоприятных условиях плавания.

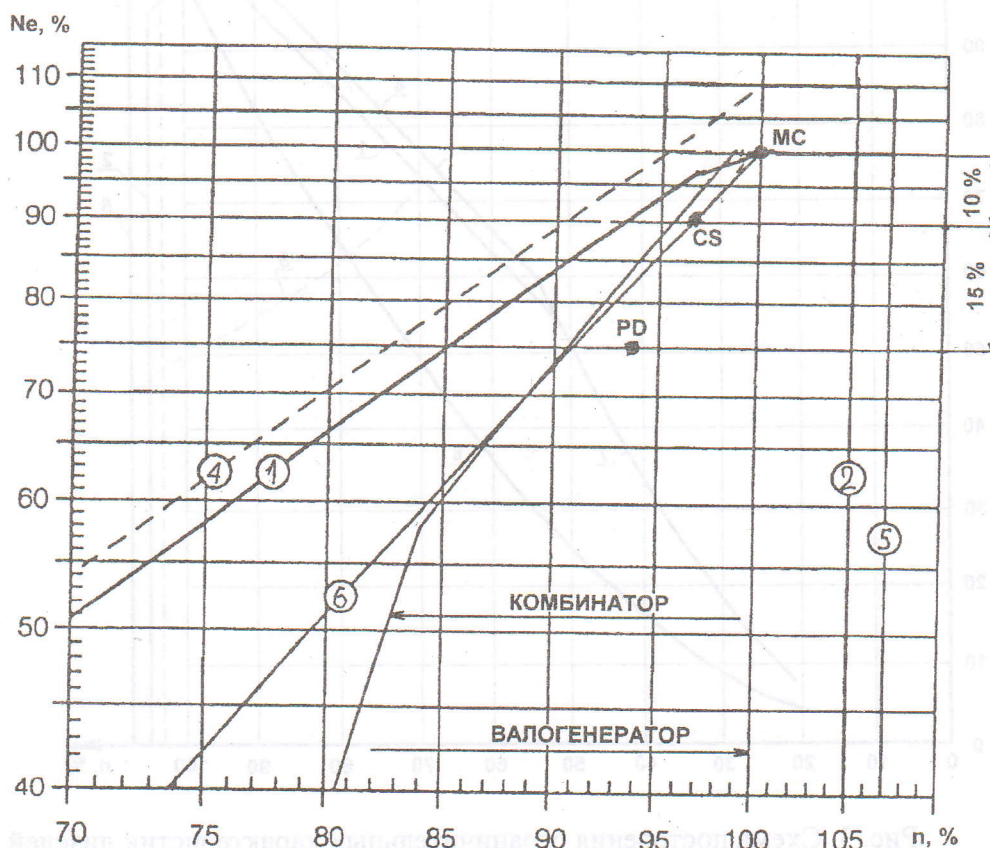


Рис. 4. Диаграмма нагрузки дизелей MAN B & W типа MC

- 1, 4 - Рабочее и предельное ограничение момента
- 3 - Ограничение мощности полного хода (50 %)
- 2, 5 - Ограничение частоты вращения (105 и 107 %)
- 6 - Базовая винтовая характеристика

Принятые запасы мощности, как показывает опыт, в тяжелых погодных условиях все же не исключают работу двигателя на линии ограничения нагрузки. Такие режимы могут быть длительными и не всегда контролируются в процессе эксплуатации.

Поэтому во избежание перегрузки важное значение имеют инструментальное и схемное отслеживание режимов работы двигателя в эксплуатации и предупредительная сигнализация о перегрузке на постах управления на мостике, в ЦПУ и местном посту.

Этим целям в пропульсивных комплексах с ВРШ служит система управления и контроля нагрузки, ограничивающая максимальный крутящий момент (индекс ТНВД) в зависимости от частоты вращения. В установках с ВФШ также используются измерители крутящего момента и мощности и программные устройства в регуляторах частоты вращения, защищающие двигатели от перегрузки и сигнализирующие о её превышении.



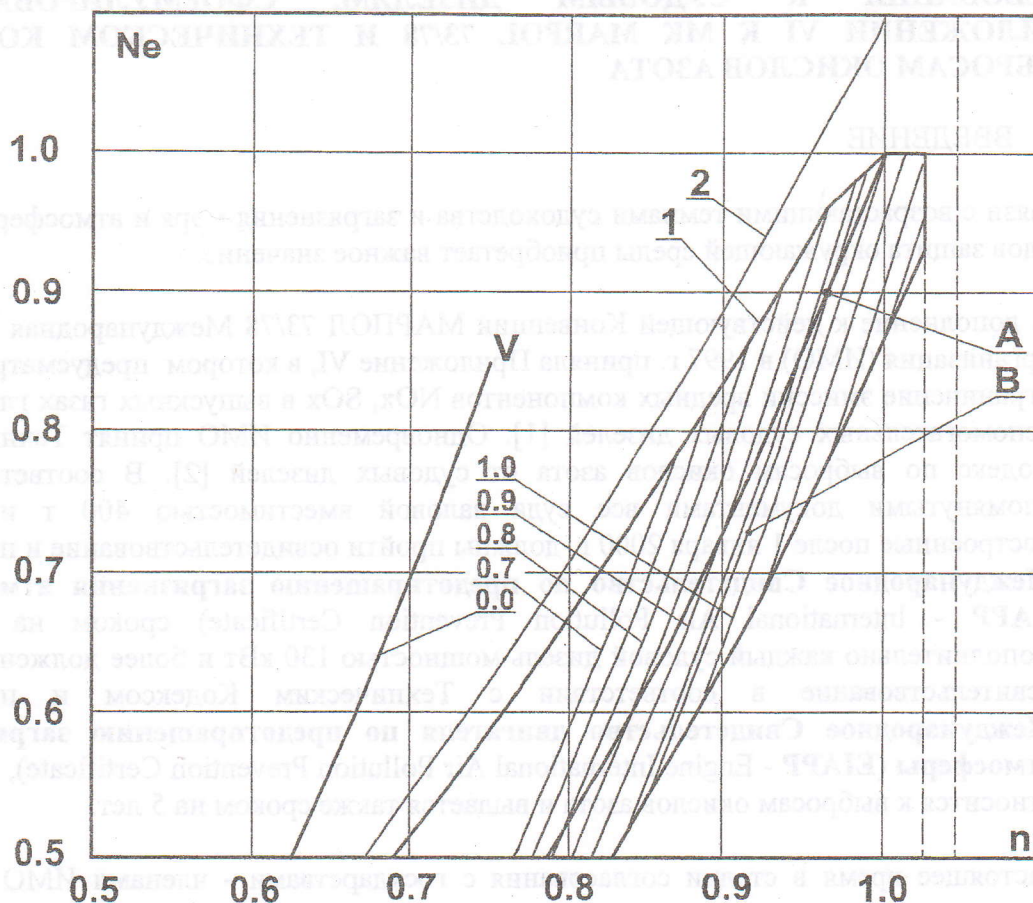


Рис 5.

Режимное поле ГД-ВРШ:

Ne - мощность,

n - частота вращения,

V - скорость.

A - при эксплуатационном состоянии корпуса.

B - при новом корпусе.

1,2 - рабочее и предельное ограничение нагрузки.

## ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

На основании изложенного можно сделать следующие выводы по ключевым вопросам обеспечения безопасности СЭУ в эксплуатации морских судов.

1. Систематизация категорий опасностей в эксплуатации СЭУ, анализ причин их возникновения и связей с внешними условиями плавания и режимами работы судов показывает, что в вопросах обеспечения безопасности приоритетное значение имеет предупреждение аварийных случаев, осуществляемое непосредственно судовым персоналом на основании критической оценки ситуации и показаний систем централизованного контроля, АПС и автоматической защиты.

2. Материалами разработки предусматривается способствовать решению таких задач путем конкретизации базисных знаний аудиторов по МКУБ, организации дополнительных учебных тренировок и тревог на судне и на берегу в системе "СУБ" судоходных компаний и проверки знаний обслуживающего персонала непосредственно на судне на основе чек-листов по предупреждению аварийных ситуаций в эксплуатации СЭУ.



# ТРЕБОВАНИЯ К СУДОВЫМ ДИЗЕЛЯМ, СФОРМУЛИРОВАННЫЕ В ПРИЛОЖЕНИИ VI К МК MARPOL 73/78 И ТЕХНИЧЕСКОМ КОДЕКСЕ ПО ВЫБРОСАМ ОКИСЛОВ АЗОТА

## ВВЕДЕНИЕ

В связи с возрастающими темпами судоходства и загрязнения моря и атмосферы выбросами с судов защита окружающей среды приобретает важное значение.

В дополнение к действующей Конвенции МАРПОЛ 73/78 Международная морская организация (ИМО) в 1997 г. приняла Приложение VI, в котором предусматривается ограничение эмиссии вредных компонентов  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$  в выпускных газах главных и вспомогательных судовых дизелей [1]. Одновременно ИМО принят Технический Кодекс по выбросам окислов азота от судовых дизелей [2]. В соответствии с упомянутыми документами все суда валовой вместимостью 400 т и более, построенные после 1 января 2000 г. должны пройти освидетельствование и получить **Международное Свидетельство по предотвращению загрязнения атмосферы (IAPP - International Air Pollution Prevention Certificate)** сроком на 5 лет. Дополнительно каждый судовой дизель мощностью 130 кВт и более должен пройти освидетельствование в соответствии с Техническим Кодексом и получить **Международное Свидетельство двигателя по предотвращению загрязнения атмосферы (EIAPP - Engine International Air Pollution Prevention Certificate)**, которое относится к выбросам окислов азота и выдается также сроком на 5 лет.

В настоящее время в стадии согласования с государствами - членами ИМО находятся и вопросы организации контроля за выпускными газами дизелей, поставляемых на суда и находящихся в эксплуатации.

Ужесточение требований к чистоте выхлопа энергетических установок в определенной степени касается и классификационных обществ, осуществляющих наблюдение за постройкой и эксплуатацией судов.

В этом отношении показательна инициатива DNV, разработавшего в 1990 г. систему безопасности и защиты окружающей среды (Safety, Environmental Protection). Судоводные компании, работающие под наблюдением DNV, получают сертификат, удостоверяющий обеспечение безопасности и защиты окружающей среды в соответствии с системой SEP. Российский морской Регистр судоходства разработал соответствующие документы [3, 4 и 5] и ведет подготовку своего персонала.

## СОСТАВ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

При сжигании углеводородных топлив в судовых дизелях наряду с безвредными для окружающей среды компонентами отработавших газов (ОГ) - кислородом, азотом и водяным паром в атмосферу выбрасываются также экологически вредные компоненты. Типичный состав ОГ судового малооборотного дизеля, работающего на режиме 100%-ной нагрузки, приведен на рис.1. Слева показано какие химические вещества вводятся в цилиндр с топливом, воздухом и смазочным маслом, а справа - какие выбрасываются в атмосферу в результате осуществления рабочих процессов в цилиндрах. Безвредные или нейтральные ( $\text{CO}_2$ ) вещества в сумме составляют 99,75% объема ОГ. Остальные 0,25% (или 2500 частей на миллион - ppm) включают в себя окислы азота  $\text{NO}_x$  серы  $\text{SO}_x$ , окись углерода CO, углеводороды  $\text{C}_x\text{H}_y$  и твердые частицы (сажа, зола). Содержание частиц принято измерять в миллиграммах на кубический метр газа в нормальных условиях ( $\text{мг/м}^3$ ).

Окись углерода, сажа и углеводороды являются результатом полного сгорания топлива. В связи с большим избытком воздуха в судовых дизелях их количество невелико по



сравнению с высокооборотными автотракторными дизелями и особенно - бензиновыми карбюраторными двигателями. Однако некоторые углеводороды, например, бензапирен, обладают сильными канцерогенными свойствами. Поэтому, несмотря на малую концентрацию, проблема снижения выброса этих компонентов также актуальна.

Такие химические вещества, как  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_x$  и др., попадая в атмосферу, нарушают ее естественный экологический баланс за счет образования слабых кислот.

В таблице 1 приведены диапазоны значений выброса вредных компонентов с ОГ дизелей различного класса, указаны их предельно допустимые концентрации (ПДК) и характер воздействия на человека (данные ИМО).

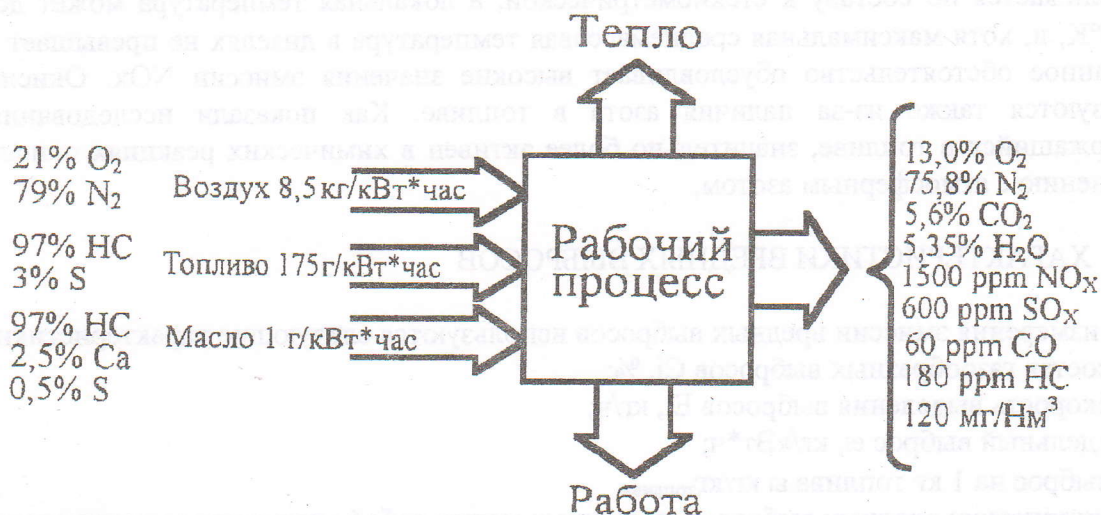


Рис.1 Типичный состав ОГ судового малооборотного дизеля

Таблица 1

Токсичные примеси в выпускных газах дизелей

Группа	Примеси	ПДК, ppm	Концентрация примеси, ppm	Концентрация, ppm и воздействие на человека
1	Азот $\text{N}_2$ , кислород $\text{O}_2$ , водяной пар $\text{H}_2\text{O}$ , углекислый газ $\text{CO}_2$	—	—	—
2	Оксид углерода $\text{CO}$	8,0	50 – 5000	100 – хронич. отравление при длительном воздействии; 500 – слабое отравление через 1 час; 10000 – потеря сознания после нескольких вдохов
3	Оксиды азота: $\text{NO}$ , $\text{NO}_2$	0,9 в пересчете на $\text{N}_2\text{O}_5$	40 – 2000	13 – раздражение слизист. оболочек носа и глаз; 40 – 80 – отёк легких
4	Углеводородные соединения $\text{C}_x\text{H}_y$	—	130 – 470	раздражение слизист. оболочек, образование опухолей
5	Альдегиды: акролеин $\text{CH}_2\text{CHCHO}$ (жидкость) формальдегид (газ) $\text{HCHO}$	0,1	10 – 40	5 – труднопереносимо; 70 – раздражение дыхательных путей и глаз
6	Сажа $\text{C}$	0,38	0.01 – 0,5 мг/л	Загрязнение воздуха и воды, ухудшение видимости
7	Сернистый ангидрид	0,12	30 – 500	17 – раздражение глаз; 40 – отравление через 3 минуты



Доля  $\text{NO}_x$  и  $\text{SO}_x$  в ОГ составляет более 80% от объема всех вредных выбросов, поэтому задача снижения эмиссии этих компонентов составляет стержень проблемы создания «экологически чистых» судовых дизелей. Содержание окислов серы в ОГ обусловлено наличием серы в топливе. При окислении серы в камере сгорания дизеля образуются  $\text{SO}_2$  и  $\text{SO}_3$ , причем преимущественно  $\text{SO}_2$  (соотношение 15:1). Образование окислов азота в камере сгорания дизеля обусловлено наличием больших количеств азота, кислорода и высокими температурами в отдельных зонах расслоенного заряда. Окисление азота начинается при температурах выше  $1500^\circ\text{K}$ , а при  $2300^\circ\text{K}$  и более реакция протекает достаточно быстро (время реакции порядка  $10^{-2} - 10^{-6}$  с).

Образование окиси азота происходит в зонах топливного факела, где смесь приближается по составу к стехиометрической, а локальная температура может достигать  $2500^\circ\text{K}$ , и, хотя максимальная среднемассовая температура в дизелях не превышает  $2000^\circ\text{K}$ , указанное обстоятельство обуславливает высокие значения эмиссии  $\text{NO}_x$ . Окислы азота образуются также из-за наличия азота в топливе. Как показали исследования, азот, содержащийся в топливе, значительно более активен в химических реакциях окисления по сравнению с атмосферным азотом.

### ХАРАКТЕРИСТИКИ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ

Для измерения эмиссии вредных выбросов используются следующие характеристики:

состав газообразных выбросов  $\text{Ci}$ , %;

скорость выделения выбросов  $\text{Ei}$ , кг/ч;

удельный выброс  $\text{ei}$ , кг/кВт\*ч;

выброс на 1 кг топлива  $\text{ei}$  кг/кг<sub>топлива</sub>.

Характеристики вредных выбросов, связанных между собой следующими соотношениями:

$$\text{Ei} = \text{ei} * \text{Gt} ,$$

где  $\text{Gt}$  – расход топлива на двигатель, кг/ч;

$$\text{ei} = \text{Ei} / \text{Ne} \text{ или } \text{ei} = \text{ei} * \text{ge} ,$$

где  $\text{Ne}$  – эффективная мощность двигателя, кВт;

$\text{ge}$  – удельный эффективный расход топлива, кг/кВт\*ч.

$$\text{Ci} = k * (\text{Ei} / \text{Gr}) * 100\% ,$$

где  $\text{Gr}$  – массовый расход газов, кг/ч;

$k$  – коэффициент, равный отношению молекулярной массы газов к молекулярной массе вредного компонента, т.е.  $k = \mu_r / \mu_i$ .

Например, для окислов азота:  $\mu_r = 29,3$ ;  $\mu_{\text{NO}_x} = 44,4$ ; тогда  $k = 0,66$ .

Расход газов через двигатель можно представить следующим образом:

через расход топлива  $\text{Gt}$ , кг/ч

$$\text{Gr} = (\varphi_a * \alpha * L_0' + 1) * \text{Gt} ,$$

где  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха при сгорании;

$\varphi_a$  – коэффициент продувки;

$L_0'$  – теоретическая масса воздуха, необходимая для сгорания 1 кг топлива.



После подстановки последней формулы в уравнение для  $C_i$ , и несложных преобразований получим:

$$C_i = \frac{k \cdot \varepsilon_i}{\varphi_a \cdot \alpha \cdot L_0' + 1} \quad (1)$$

Из формулы (1) следует, что объемная концентрация вредных компонентов в ОГ зависит от степени их разбавления воздухом, поэтому для сравнения уровня их эмиссии для различных дизелей  $C_i$  приводят (пересчитывают) к концентрации избыточного кислорода сухих ОГ (после конденсации паров  $H_2O$ ), равной 15%.

Вследствие изменения условий смесеобразования и сгорания топлива в цилиндре дизеля, при его работе на различных скоростных и нагрузочных режимах меняются количества выделяемых с ОГ вредных компонентов. На рис.2 показана типичная картина эмиссии окислов азота судовым четырехтактным дизелем VASA 32 (фирма «Wärtsilä») при работе по винтовой (1) и нагрузочной (2) характеристикам.

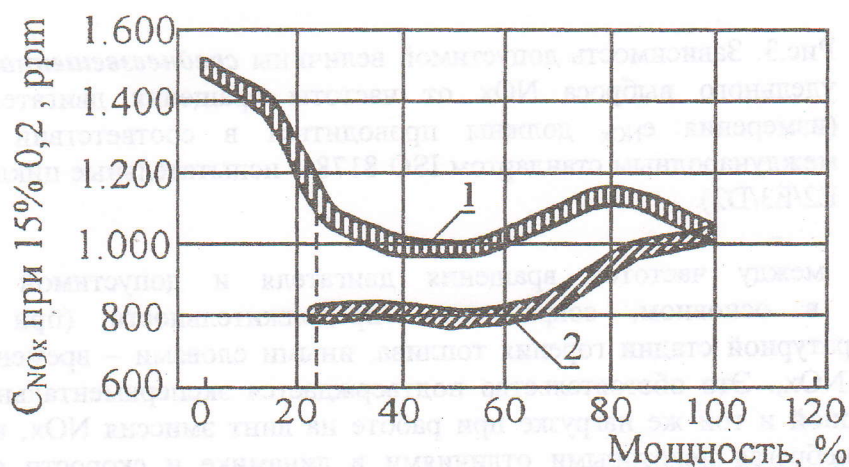


Рис.2 Эмиссия окислов азота с ОГ судового среднеоборотного дизеля при работе на режимах винтовой (1) и нагрузочной (2) характеристик

По данным фирмы «MAN B & W» величина эмиссии вредных компонентов в зависимости от серии, числа цилиндров, уровня форсировки, может существенно отличаться. Так, например, для дизелей серии MCE величина  $C_{NOx}$  составляет в среднем 1000 ppm (0,1%), тогда как дизели более ранних выпусков (серия GFCA) имеют эмиссию  $NOx$ , порядка 1600 ppm.

### БОРЬБА С ВРЕДНЫМИ ВЫБРОСАМИ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

В настоящее время действующие законодательства по выбросам морского транспорта имеют местный характер. Приведем ряд примеров:

- запрещена работа вспомогательных двигателей паромов в порту Гетеборг (требуется подключение к береговой сети);
- ограничено использование тяжелого топлива с высоким содержанием серы на парамах в портах Стокгольм и Хельсинки;
- заданы пределы для выбросов окислов азота и серы дизелями речных судов в определенных районах штата Калифорния (США).

Ограничения на эмиссию окислов азота, сформулированные в Приложении VI МК МАРПОЛ 73/78 и техническом Кодексе иллюстрируются графиком на рис.3.



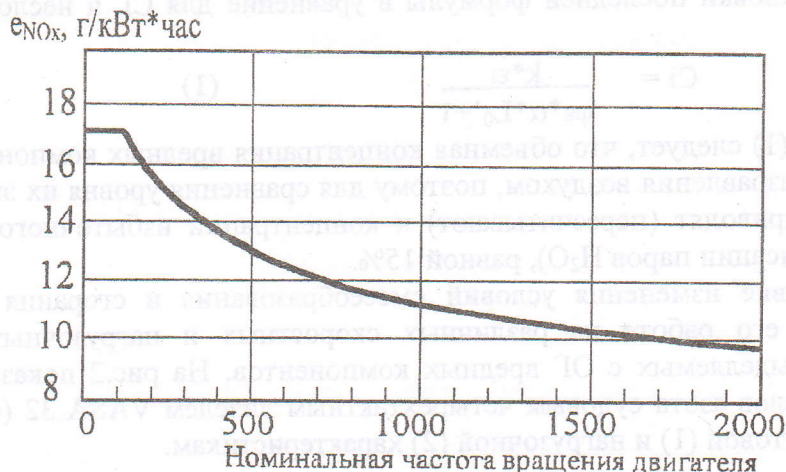


Рис.3. Зависимость допустимой величины *средневзвешенного* удельного выброса  $NOx$  от частоты вращения двигателя (измерения  $e_{NOx}$  должны проводиться в соответствии с международным стандартом ISO 8178 – испытательные циклы E2/E3/D2)

Зависимость между частотой вращения двигателя и допустимой величиной  $e_{NOx}$ , объясняется, в основном, сокращением продолжительности (при возрастании  $n$ ) высокотемпературной стадии горения топлива, иными словами – времени, отводимого на образование  $NOx$ . Это обстоятельство подтверждается экспериментальными данными на рис.2: при одной и той же нагрузке при работе на винт эмиссия  $NOx$ , в среднем больше на 20%. Пренебрегая некоторыми отличиями в динамике и скорости смесеобразования, примем постоянство продолжительности высокотемпературной стадии горения по углу поворота коленчатого вала  $\varphi_{zo}$ . Тогда время горения  $\tau_{zo} = \varphi_{zo} / (6 \cdot n)$ . Так, например, при  $n = 50\%$  и нагрузке 22,5% выбросы  $NOx$  для винтовой характеристики в два раза больше, чем для нагрузочной.

Как уже отмечалось ранее, выбросы  $SOx$ , обусловлены содержанием серы в топливе. Снизить выброс  $SOx$ , можно двумя путями:

1. Снизить содержание серы в топливе путем его очистки.
2. Уменьшить выброс  $SOx$ , в атмосферу путем очистки ОГ.

Несмотря на то, что очистка топлива от серы на перерабатывающих заводах ведет к его удорожанию, этот вариант, по-видимому, будет использоваться как основной. Это обусловлено тем обстоятельством, что удаление  $SOx$ , из ОГ путем пропуска через устройства мокрой очистки (скрубберы) потребует также очень больших капитальных вложений. Возникают также проблемы в связи с необходимостью хранения и сдачи на берег серной кислоты слабой концентрации (большие объемы жидкостей потребуют достаточных емкостей), а, следовательно, приведут к повышению эксплуатационных расходов.

Упомянутое выше Приложение VI к Конвенции МАРПОЛ 73/78 запрещает использование на судах топлива с содержанием серы более 4,5%, а в особых зонах – более 1,5%.

Борьбу с выбросом  $NOx$ , можно вести первичными методами, воздействуя на рабочие процессы дизелей таким образом, чтобы уменьшить количество образующихся  $NOx$ , в цилиндрах.

В свою очередь, первичные методы можно разделить на две группы:

- а) требующие изменения конструкции дизеля или отдельных его элементов, реализуемых при разработке новых дизелей:



- совершенствование системы впрыска и смесеобразования дизеля;
- совершенствование системы турбонаддува;
- выбор оптимального газораспределения;
- выбор оптимальной частоты вращения коленчатого вала;
- организация вихревого движения заряда в камере сгорания и др.;

б) не требующие существенного изменения конструкции, реализация которых возможна при незначительной модернизации двигателя:

- перевод дизеля на работу на водотопливной эмульсии (ВТЭ);
- изменение фаз топливоподачи;
- рециркуляция части отработавших газов и др.

В настоящее время реальную апробацию прошли первые два способа реализованные фирмой «MAN B & W». Физический смысл влияния этих факторов на эмиссию  $\text{NO}_x$ , состоит в том, что в обоих случаях уменьшается температура газов при сгорании топлива, определяющая скорость образования  $\text{NO}_x$  в цилиндре.

На рис.4 приведены результаты испытания судового малооборотного дизеля фирмы «MAN B & W» 7L90GSCA при работе на водотопливной эмульсии в сочетании с уменьшенным углом опережения подачи топлива. В верхней части рисунка приведены кривые изменения объемной концентрации  $\text{NO}_x$ , в ОГ (в пересчете на 15%  $\text{O}_2$ ) в зависимости от содержания воды в ВТЭ для двух режимов: 100%-ной мощности (MCR) и 81%-ной мощности. Штриховой горизонтальной линией показан предельный уровень  $C_{\text{NO}_x} = 600 \text{ ppm}$ , установленный агентством по предотвращению загрязнения окружающей среды США (EPA). В нижней части рисунка показано, как при этом увеличивается удельный эффективный расход топлива.

Результаты испытаний позволили определить оптимальные значения факторов для достижения требуемого уровня эмиссии:

доля присадочной воды 22%;

угол опережения подачи уменьшен на  $2^\circ \text{ПКВ}$ .

Удельный эффективный расход топлива увеличивается при этом на  $2 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$ , что обусловлено увеличением продолжительности впрыска топлива и снижением максимального давления сгорания.

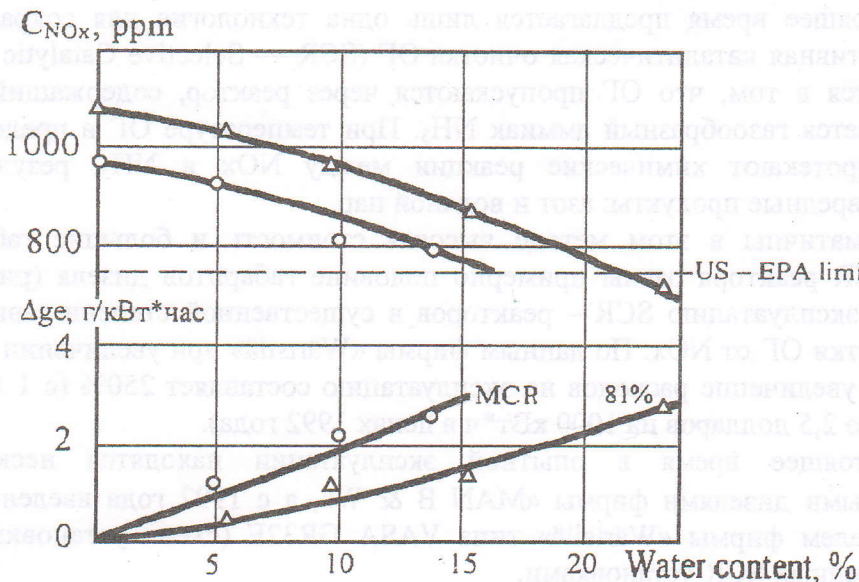


Рис.4 Изменение концентрации  $\text{NO}_x$  в отработавших газах судового дизеля 7L90GSCA и его топливной экономичности при работе на ВТЭ



Специалисты полагают, что более существенный эффект может быть достигнут при рециркуляции части отработавших газов из выпускной системы на всасывание центробежного компрессора. При этом уменьшается концентрация кислорода в смеси газов в цилиндре, возрастают теплоемкость и газовая постоянная рабочего тела и, как следствие — уменьшается температура газов в цилиндре при сгорании топлива. Оба фактора обуславливают уменьшение количества  $\text{NO}_x$ , образующихся в цилиндре. Однако перепуск газов ведет к снижению коэффициента избытка воздуха при сгорании, поэтому этот способ применим, когда имеется достаточный «запас» по воздуху (например, на малых нагрузках). В судовых дизелях, работающих на высокосернистых топливах, этот способ неприемлем, так как в ОГ, перепускаемых на всасывание, содержится значительное количество  $\text{SO}_x$ . При наличии паров воды в наддувочном воздухе будет происходить интенсивное образование серной кислоты в воздушном тракте и цилиндрах при продувке. Аналогичные проблемы возникают (в меньшей степени) и при работе дизелей на ВТЭ: опыт работ в Северном морском пароходстве показал интенсивное коррозионное разрушение газораспределительного тракта.

Фирма «Wärtsilä» разработала и испытала на своих дизелях серий VASA 32 и VASA 46 систем впрыска воды и подачи пара в цилиндры для снижения выбросов  $\text{NO}_x$ . Отмечается существенный эффект (до 70% снижения эмиссии  $\text{NO}_x$ ). Практическое внедрение на судах получила также технология увлажнения наддувочного воздуха дизелей путем впрыски заборной воды за центробежным компрессором (НАМ).

К первичным методам снижения эмиссии можно отнести также выбор оптимального режима работы дизеля. Например, если главный двигатель нагружен винтом регулируемого шага, то для снижения эмиссии  $\text{NO}_x$ , малый и средний ход целесообразно осуществлять на режиме  $n = \text{const}$  (см. рис.2), т.е. изменять скорость судна только за счет изменения шага винта. Это позволяет снизить выброс  $\text{NO}_x$ , на 10 - 25% по сравнению с режимами комбинаторной кривой.

В целом, по мнению специалистов, за счет первичных методов реально можно достигнуть снижения эмиссии  $\text{NO}_x$ , на 30 - 70%. Если международными законодательствами будут введены более жесткие требования по ограничению выбросов, первичных методов будет недостаточно. В этом случае необходимо использовать вторичные методы или их комбинацию с первичными.

В настоящее время предлагается лишь одна технология для сокращения выбросов  $\text{NO}_x$ , — селективная каталитическая очистка ОГ (SCR — Selective Catalytic Reduction). Суть ее заключается в том, что ОГ пропускаются через реактор, содержащий катализатор. В реактор подается газообразный аммиак  $\text{NH}_3$ . При температуре ОГ в пределах 350 - 450°C в реакторе протекают химические реакции между  $\text{NO}_x$  и  $\text{NH}_3$ , результатом которых являются безвредные продукты: азот и водяной пар.

Проблематичны в этом методе высокая стоимость и большие габариты системы. Габариты SCR реактора равны примерно половине габаритов дизеля (рис.5). Расходы на установку и эксплуатацию SCR — реакторов в существенной степени зависят от заданной степени очистки ОГ от  $\text{NO}_x$ . По данным фирмы «Wärtsilä» при увеличении степени очистки с 50 до 90% увеличение расходов на эксплуатацию составляет 250% (с 1 доллара США на 1000 кВт\*ч до 2,5 долларов на 1000 кВт\*ч в ценах 1992 года).

В настоящее время в опытной эксплуатации находятся несколько судов с малооборотными дизелями фирмы «MAN B & W», а с 1992 года введен в эксплуатацию паром с дизелем фирмы «Wärtsilä» типа VASA GR32E (схема установки изображена на рис.5), снабженных SCR-установками.



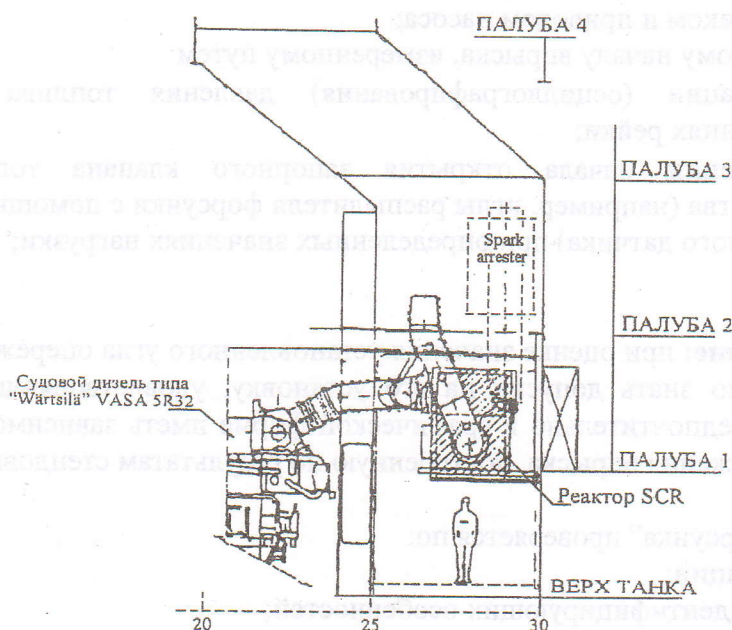


Рис.5 Схема установки с SCR реактором

В связи с тем, что температура ОГ среднеоборотного двигателя достаточно высока, SCR реактор размещают после турбины. В малооборотных дизелях приходится устанавливать их до газотурбонагнетателей, что вызывает ряд проблем эксплуатации: из-за большого объема реактора ухудшаются характеристики системы наддува, понижается надежность турбины из-за утечек непрореагировавшего аммиака и катализаторной пыли, не решена проблема загрязнения катализатора сажей и золой. На основании обобщения имеющегося опыта специалисты считают, что на ближайшие годы для судовых установок предпочтительным является сокращение выбросов  $\text{NO}_x$  с помощью первичных методов.

## МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СПРАВКИ

### Приложение 3 к "Руководству по техническому надзору за выбросами $\text{NO}_x$ при освидетельствовании судов" [5]

Перечень проверок для метода сверки параметров двигателя.

1 Отдельные параметры двигателя могут быть освидетельствованы различными способами, причем одного из них должно быть достаточно для демонстрации соответствия фактического значения проверяемого параметра его проектному значению. Старший механик судна с учетом рекомендаций изготовителя дизеля и при одобрении Регистра может выбрать наиболее предпочтительный способ проверки.

Рабочие параметры дизеля, существенно влияющие на выбросы  $\text{NO}_x$  значения которых изменяются в зависимости от нагрузки, например, такие как давление наддува, максимальное давление сгорания, температура наддувочного воздуха, температура отработавших газов, должны быть представлены для проверки в виде, позволяющем установить влияние изменения этих параметров на изменение выброса  $\text{NO}_x$ . При этом необходимо убедиться, что степень сжатия в дизеле соответствует исходной при первоначальной сертификации (см. п.1.7 этого приложения).



.1 параметр “угол опережения впрыска топлива” проверяется по:

- .1. положению кулачка валика THBD (каждого отдельного кулачка или валика в целом, если кулачки не регулируемые) например, по положению промежуточного звена между валиком и приводом насоса;
- .2. фактическому началу впрыска, измеренному путем:
  - регистрации (осциллографирования) давления топлива при определенных положениях рейки;
  - регистрации начала открытия запорного клапана топливовпрыскивающего устройства (например, иглы распылителя форсунки с помощью индукционного или емкостного датчика) при определенных значениях нагрузки;

**Примечание:** при оценке значения установленного угла опережения впрыска топлива необходимо знать допуски на его установку, удовлетворяющие нормам выбросов NOx, и предпочтительно в графической форме иметь зависимость выбросов NOx от угла опережения впрыска, построенную по результатам стендовых испытаний.

.2 параметр “форсунка” проверяется по:

- .1. спецификации;
- .2. перечню идентифицирующих особенностей;

.3 параметр “THBD” проверяется по:

- .1. спецификации;
- .2. перечню идентифицирующих особенностей, определяющих конструкцию плунжера и втулки;

.4 параметр “кулачок THBD” проверяется по:

- .1. перечню идентифицирующих особенностей, определяющих профиль;
- .2. началу и концу подачи для определенного положения рейки THBD (динамические измерения давления топлива);

.5 параметр “давление впрыска” проверяется только для обычных разделенных топливopодающих систем по:

- .1. зависимому от нагрузки давлению в трубке и графику его корреляции с выбросами NOx;

.6 параметр “камера сгорания” проверяется по:

- .1. перечню идентифицирующих признаков для крышки цилиндра и головки поршня;

.7 параметр “степень сжатия” проверяется по:

- .1. фактическому надпоршневому зазору;
- .2. вкладышам поршневого пальца или шатуна;

.8 параметр “тип и конструкция турбокомпрессора” проверяется по:

- .1. модели и спецификации (идентифицирующие признаки);
- .2. зависимому от нагрузки давлению наддува и графику его корреляции с выбросами NOx;

.9 параметр “охладитель наддувочного воздуха, преднагреватель сжатого воздуха” проверяется по:

- .1. модели и спецификации;
- .2. зависимой от нагрузки температуре наддувочного воздуха, приведенной к эталонным условиям, и графику ее корреляции с выбросами NOx;

.10 параметр “фазы газораспределения” проверяется только для чetyрехтактных двигателей по:

- .1. положению кулаков;
- .2. фактическим углам открытия и закрытия клапанов;
- .3. фактической продолжительности открытия клапанов;



11 параметр "впрыск воды" проверяется по:

1. зависимому от нагрузки расходу воды (дозирование) и графику его корреляции с выбросами NOx;

12 параметр "эмульсионное топливо" проверяется по:

1. зависимому от нагрузки положению рейки THBD (дозирование);
2. зависимому от нагрузки расходу воды (дозирование) и графику его корреляции с выбросами NOx;

13 параметр "рециркуляция отработавших газов" проверяется по:

1. зависимому от нагрузки массовому расходу рециркулируемых газов (дозирование) и графику его корреляции с выбросами NOx;
2. концентрации CO<sub>2</sub> в смеси свежего воздуха и рециркулируемых отработавших газов, например, в "продувочном воздухе" (контроль);
3. концентрации O<sub>2</sub> в "продувочном воздухе" (контроль);

14 параметр "селективная каталитическая очистка" СКО (SCR) проверяется по:

1. зависимому от нагрузки расходу активной среды (дозирование) и графику его корреляции с концентрацией NOx на выходе из реактора;
2. зависимому от нагрузки значению концентрации NOx за СКО (SCR) (периодический контроль).

2 Для двигателей с селективной каталитической очисткой газов, не регулируемой с помощью обратной связи, измерения NOx (периодические проверки или мониторинг) полезны для проверки того, что эффективность СКО (SCR) соответствует состоянию во время сертификации, независимо ни от внешних условий, ни от качества топлива, влияющих на выбросы с неочищенными отработавшими газами.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Приложение VI «Предотвращение загрязнения атмосферы с судов»: Международная Конвенция MARPOL 73-78, книга III. С-Петербург. ЗАО ЦНИИМФ. 2000 г. Стр. 1 – 83.
2. Технический Кодекс по выбросам окислов азота от судовых дизелей : Международная Конвенция MARPOL 73-78, книга III. С-Петербург. ЗАО ЦНИИМФ. 2000 г. Стр. 84 – 281.
3. Руководство по техническому надзору за предотвращением загрязнения атмосферы с судов. Российский Морской Регистр Судоходства. С-Петербург. 2000 г.
4. Руководство по техническому надзору за выбросами окислов азота (Nox) при изготовлении главных и вспомогательных судовых дизелей. Российский Морской Регистр Судоходства. С-Петербург, 2000 г.
5. Руководство по техническому надзору за выбросами окислов азота (Nox) при освидетельствованиях судов. Российский Морской Регистр Судоходства. С-Петербург. 2000 г.

## ДЕЛОВАЯ ИГРА

Деловая игра проводится на персональных компьютерах в течение 4 академических часов. В качестве объекта используется компьютерная программа "Расчет индикаторной диаграммы дизеля и эмиссии NOx" (разработка ГМА). Содержанием деловой игры является моделирование пунктов 1-12 метода сверки параметров и анализ влияния упомянутых в них параметров на величину выброса NOx конкретного судового дизеля.