

УДК 629.5.03-08
Ш 79

К ВОПРОСУ О ТОКСИЧНЫХ ОКСИДАХ АЗОТА В ОТХОДЯЩИХ ГАЗАХ МАЛООБОРОТНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

В. П. Шостак, канд. техн. наук, проф.;
А. Ю. Манзюк, ассист.

Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

Аннотация. Рассмотрены обобщенные параметры входных и выходных веществ и энергетических потоков современного малооборотного двигателя, механизм образования в цилиндре дизеля оксидов азота I, II и IV групп и основные химические реакции взаимодействия Оксигена (O) с Нитрогеном (N). Проанализированы известные методы снижения NO_x в отходящих газах, оценены разные направления снижения уровня экологического воздействия главных судовых дизелей на окружающую среду при переходе от Tier I к Tier II и далее к Tier III, выявлено неизбежное снижение при этом тепловой экономичности дизелей.

Ключевые слова: малооборотный двигатель, состав отходящих газов, температура в цилиндре, оксиды азота, впрыск воды в цилиндр.

Анотація. Розглянуто узагальнені параметри вхідних і вихідних речовин та енергетичних потоків сучасного малооборотного двигуна, механізм утворення в циліндрі дизеля оксидів азоту I, II і IV груп та основні хімічні реакції взаємодії Оксигену (O) з Нітрогеном (N). Проаналізовано відомі методи зниження NO_x у відхідних газах, оцінено різні напрями зниження рівня екологічного впливу головних судових дизелів на довкілля при переході від Tier I до Tier II і далі до Tier III та виявлено неминуче зниження при цьому теплової економічності дизелів.

Ключові слова: малооборотний двигун, склад відхідних газів, температура в циліндрі, оксиди азоту, вприскування води в циліндр.

Abstract. The generalized parameters of input and output substances and power streams of modern low speed engine, oxides I, II and IV groups formation procedure in the diesel cylinder and basic chemical reactions of Oxygen (O) with Nitrogen (N) interaction are examined. The known methods of NO_x reduction in off-gas are analyzed, the different ways of decreasing of main ship diesels' ecological influence in transition from Tier I to Tier II and further to Tier III are estimated and wherein an inevitable decline of diesels' thermal economy is specified to.

Keywords: low speed engine, consist of off-gas, temperature in a cylinder, oxides of nitrogen, water injection in a cylinder.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Высокая топливная экономичность малооборотных дизелей (МОД) обусловлена высокой температурой их термодинамического цикла, однако при такой температуре образуются оксиды азота NO_x , основная часть которых токсична для человека. По мере развития дизелей, сопровождающегося ростом верхней температуры цикла, концентрация NO_x в отходящих газах возрастала и на рубеже 70–80-х годов прошлого века удельное количество этих оксидов составило около 17 г/(кВт·ч), а для некоторых моделей МОД достигло 21 г/(кВт·ч). Увеличение морских перевозок и, следовательно, количества судов с МОД, с одной стороны, и погоня за все более низким удельным расходом топлива, с другой, привели к угрожающему количеству оксидов NO_x , отравляющих окружающую среду, особенно в портах и в районах Мирового океана с интенсивным судоходством, например в Северном и Балтийских морях. Мировое сообщество в лице Международной морской организации (International Maritime Organization – IMO) взяло курс на снижение выбросов NO_x с судов, установив определенные до-

пустимые нормы, которые должны снижаться с течением времени.

Естественно, снижение эмиссии NO_x требует решения научных, инженерно-конструкторских и эксплуатационных задач, что влечет за собой значительные расходы. Комплекс мероприятий, проведенных мировыми разработчиками МОД, позволяет определить некоторые пути снижения эмиссии NO_x и оценить частичное решение этой проблемы, поскольку они так или иначе сопровождаются снижением термодинамической эффективности МОД. Поиск действенных механизмов, методов и приемов для уменьшения вредного воздействия транспортных судов на окружающую среду требует новых гипотез в этом направлении.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Рассматриваемой проблеме посвящено огромное количество публикаций, например [1–3]. Характерной чертой большинства из них является некоторая недосказанность, особенно в отношении физико-

химических процессов, протекающих в цилиндре двигателя с образованием оксидов NO_x , что, видимо, объясняется жесткой конкурентной борьбой на рынке судового энергетического оборудования и морских транспортных услуг. Вместе с тем сложнейшая проблема отрицательного воздействия высокоэффективных по топливной экономичности современных МОД на окружающую среду и почти безоговорочное нежелание понижать термодинамическую эффективность привели к объединению основных разработчиков и производителей МОД, о чем свидетельствует Международный комплексный проект по созданию экологически безопасных судовых дизелей HERCULES (High Efficiency R&D on Combustion with Ultra Low Emissions for Ships), бюджет которого превышает 30 млн евро. В консорциум по реализации этого проекта, возглавляемый крупными компаниями MAN B&W и Wärtsilä, входят более 40 участников, в частности производители судового энергетического оборудования, ряд университетов, научно-исследовательских институтов, сухоходных компаний.

ЦЕЛЬ СТАТЬИ – попытка обобщить разрозненные данные о механизме образования оксидов азота в цилиндре МОД, что, на взгляд авторов, не лишнее на пути разрешения указанной проблемы.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

На рис. 1 изображено сечение двигателя ведущей в области разработок МОД фирмы MAN S50ME-C8.2-ТП с указанием материальных и внешних энергетических потоков при спецификационной мощности, составляющей 90 % от номинальной (от мощности в точке L_1 [4]). Данные, приведенные на рис. 1, получены расчетным путем с помощью сервисной программы CEAS MAN Diesel & Turbo для шестицилиндрового двигателя с турбокомпрессором (ТК) A170-L37 при настройке его на уровень «High Load». При определении относительных энергетических потоков энергия, выделенная при сгорании топлива, принята за 100 %, т. е. $e_T = 100$ %. На рисунке относительные энергетические потоки обозначены буквой «e», а индексы соответствуют отводу энергии: «в» – с водой; «о.г» – с отходящими газами (после ТК); «м» – с маслом; «н.в» – с наддувочным воздухом. Индекс «п» определяет полезную механическую энергию на валу двигателя, т. е. эффективный коэффициент полезного действия (КПД) η_e . Соотношение между величинами энергетических потоков зависит от параметров окружающей среды. Верхние числа соответствуют температуре засасываемого ТК воздуха $t_{в}$ и температуре воды на входе в воздухоохладитель $t_{о.в}$, равной 25 °С (международный стандарт ISO), а нижние –

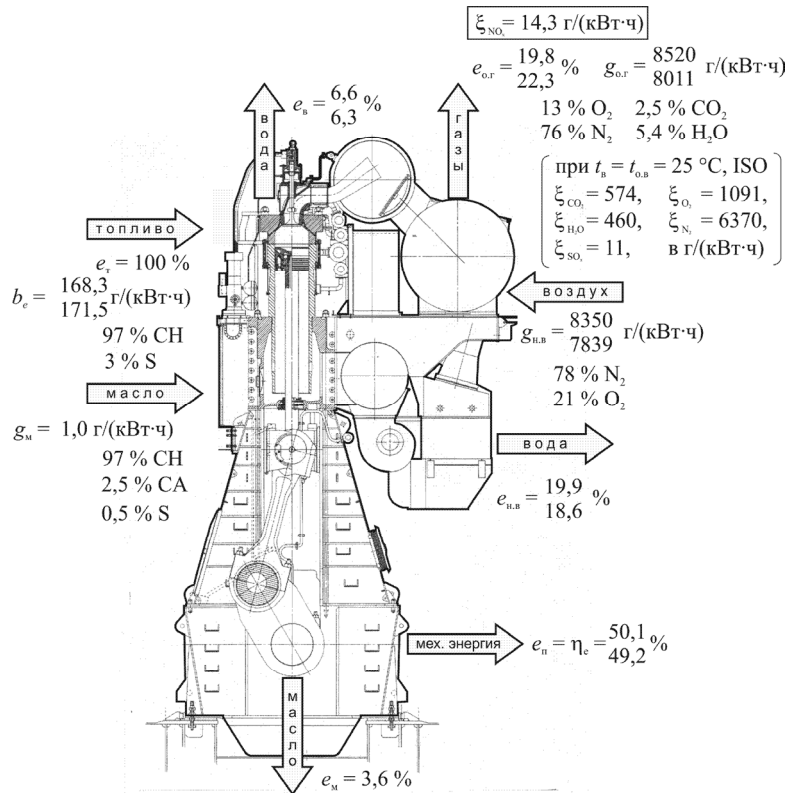


Рис. 1. Малооборотный двигатель семейства ME и параметры его материальных и внешних энергетических потоков при $\bar{N} = 100$ %

соответственно 45 и 36 °С (тропические условия). В первом случае давление наддувочного воздуха (за ТК) составляет 4,14 бара, во втором 4,00 бара. Для продувки цилиндров и сжигания топлива используется воздух непосредственно из машинного отделения (МО). Наружный воздух, поступающий в МО через систему вентиляции, является физической смесью газов и паров воды; количество последних зависит от его температуры. При относительной влажности воздуха 70 % количество воды в нем при температуре 15...35 °С составляет 8...25 г на 1 кг воздуха. В сухом воздухе содержатся азот (78 %), кислород (21 %), диоксид углерода (0,03 %) и небольшое количество инертных газов (Гелия, Неона, Аргона). В цилиндр двигателя вносятся топливо, цилиндрическое масло, наддувочный воздух, а выходят из него отходящие газы, удельное количество которых, г/(кВт·ч), обозначено соответственно $b_e, g_m, g_{н.в}, g_{о.г}$ (см. рис. 1). В отходящих газах содержатся различные вещества, в том числе и оксиды азота. Удельное количество последних колеблется, в зависимости от нагрузки двигателя \bar{N} , в диапазоне $\xi_{NO_x} = 13,9...18,1$ г/(кВт·ч). С уменьшением нагрузки растет ξ_{NO_x} , и при $\bar{N} = 25$ % удельное количество оксида азота составляет около 17,1...18,1 г/(кВт·ч). Приведенные удельные количества диоксида углерода ξ_{CO_2} , воды ξ_{H_2O} , оксидов серы ξ_{SO_x} , кислорода ξ_{O_2} и азота ξ_{N_2} – это усредненные данные, характерные для современных МОД.

Количество цилиндрического масла, необходимого для смазки и нейтрализации вредного влияния оксидов серы на цилиндропоршневую группу, зависит от ряда факторов, в том числе от щелочного числа масла BN (Base Number), и для топлива с содержанием серы 3 % составляет:

g_m , г/(кВт·ч)	- 0,78	0,90	1,08	1,35
для NB	- 70	60	50	40

Исходя из этого, на рис. 1 $g_m = 1$ г/(кВт·ч).

Международным стандартом для судовых дизелей является Приложение VI к Международной конвенции MARPOL, которое устанавливает предельную норму выбросов NO_x (дымность и выбросы твердых частиц и углеводородов не регламентированы). В настоящее время, хотя литературные данные несколько противоречивы, можно считать руководящими следующие нормы:

уровень выбросов NO_x	Tier I	Tier II	Tier III
	(с 2011 г.)	(с 2016 г.)	
предельная норма ISO, г/(кВт·ч)	17	14,4	3,4

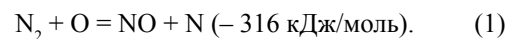
Выбросы оксидов азота двигателем рассчитываются как средневзвешенная величина по следующему уравнению:

$$\xi_{NO_x} = 0,05\xi_{25} + 0,11\xi_{50} + 0,55\xi_{75} + 0,29\xi_{100}$$

где индексы 25, 50, 75 и 100 указывают нагрузку двигателя, при которой определяется удельное количество NO_x .

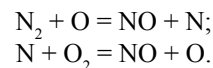
Вычисленная таким образом величина сопоставляется с предельной нормой ISO. Использование этого уравнения не дает, к сожалению, полного представления о вредном воздействии двигателя на окружающую среду, особенно сейчас, когда реализованы электронные системы для управления впрыском топлива, поскольку количество оксидов азота зависит от настройки МОД и его нагрузки (развиваемой мощности).

В цилиндре работающего двигателя происходят сложные физико-химические процессы с быстрым изменением давления и температуры. По мере сгорания топлива температура достигает таких значений, когда происходит диссоциация (распад) молекул кислорода O_2 и азота N_2 на атомы – Кислород O и Нитроген N. Таким образом, в цилиндре двигателя кислород и азот находятся как в виде молекул, так и в виде атомов. Механизм и скорость реакции образования оксида азота II (монооксида) NO зависят от концентраций молекулярного азота (N_2) и атомарного кислорода (O) и от температуры продуктов сгорания. Решающую роль в образовании оксидов азота играет реакция [2], уравнение которой

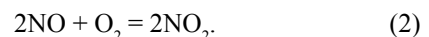


Как видим, для образования монооксида азота необходимы значительные энергетические затраты – 316 кДж/моль. Образование Кислорода ($O_2 \rightarrow O + O$) сопровождается также значительным энергопотреблением – 494/2 кДж/моль [2]. Таким образом, высокий энергетический уровень указанных реакций предопределяет сильную зависимость образования NO от температуры.

Исключительная сложность окислительных реакций в цилиндре двигателя и их быстротечность не позволяют однозначно трактовать процессы образования оксидов азота. Особого внимания заслуживает предположение, что в цилиндре двигателя за фронтом пламени протекают следующие реакции по цепочному механизму Зельдовича [2, 5]:



Монооксид азота реагирует с кислородом с образованием оксида азота IV, т. е. диоксида NO_2 :



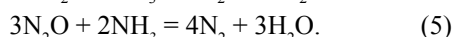
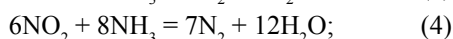
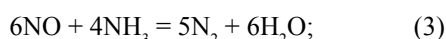
При быстром падении температуры, что имеет место в цилиндре двигателя при движении поршня вниз, монооксид азота как бы «закаляется», и реакция с образованием NO_2 протекает вяло, так что количество диоксида азота в отходящих газах сравнительно невелико. В цилиндре МОД образуется также и небольшое количество оксида азота I, т. е. закиси N_2O – веселящего газа.

Примерные соотношения между оксидами азота в отходящих газах МОД (по данным Лори Голдсворси, 2002 г., Австралия, и М.М. Хагояна, А.В. Туркина, 2012 г., Россия) следующие:

NO _x	NO	NO ₂	N ₂ O
100 %	94 %	5 %	1 %.

Все оксиды азота, кроме веселящего газа N₂O, токсичны; вдыхание их поражает дыхательные пути.

Исключить наличие оксидов азота в отходящих газах двигателя можно реализацией восстановительных реакций с помощью, например, аммиака NH₃, в результате которых получаются азот и вода:



Аммиак для этих целей можно получить из мочевины CO(NH₂)₂, впрыснув ее водный раствор в поток отходящих от двигателя газов, когда их температура составляет ~400 °С, т. е. перед ТК, с выделением оксида углерода IV – диоксида CO₂ (углекислого газа) согласно уравнению



Как результат обобщения разноплановых сведений, на рис. 2 представлены зависимости средней температуры t и давления p в цилиндре двигателя S70ME-C от угла поворота коленчатого вала φ при движении поршня вниз для номинальных мощности и частоты вращения (в точке L_1 цилиндрическая эффективная мощность $N_{\text{ен}}^n = 3110$ кВт и $n_n = 91$ мин⁻¹). Штриховая линия отображает зависимость $p = f(\varphi)$ при нагрузке, составляющей 50 % от номинальной. На этих зависимостях указаны значения величин в характерных точках. Также указаны среднеэффективные давления $p_{\text{ме}} = 1,9$ МПа и $p'_{\text{ме}} = 1,2$ МПа. Слева обозначены характерные углы: $\varphi_{\text{в.т}}$ – впрыск топлива; $\varphi_{\text{о.в}}$ и $\varphi_{\text{з.в}}$ – опережения и завершения впрыска; $\varphi_t^{\text{max}} = 20^\circ$ – максимальной температуры; $\varphi_p^{\text{max}} = 14^\circ$ – максимального давления; $\varphi_{\text{о.к}}$ и $\varphi_{\text{з.к}}$ – открытия и закрытия газоразпускного клапана; $\varphi_{\text{о.о}} = 145^\circ$ и $\varphi_{\text{з.о}} = 215^\circ$ – открытия и закрытия продувочных окон, а также ВМТ и НМТ – верхняя и нижняя мертвые точки; ОВК и ОПО – открытия газоразпускного клапана и продувочных окон; S_p и S – рабочий и полный ход поршня.

Согласно многочисленным данным при температурах 1700...2200 °С азот перестает быть неактивным и соединяется с Оксигеном – см. уравнение (1), поскольку при этих температурах молекулы кислорода диссоциируют на атомы. Количество образовавшихся оксидов азота зависит от времени пребывания молекул N₂ и O₂ при температурах выше 1700 °С и, естественно, от концентрации Оксигена, прежде всего вне зоны пламени. Горение происходит в области, в которой топливо испаряется и смешивается с возду-

хом. Скорость сгорания предопределяется в основном скоростью, с которой пары топлива могут испаряться и смешиваться с воздухом, что, в свою очередь, зависит от конфигурации струй топлива и воздуха, а также от скорости впрыска. Скорость окисления N₂ значительно меньше скорости сгорания углеводородов, поэтому естественно предположить, что NO образуется в основном за зоной пламени и наличие значительного количества оксидов азота в отходящих газах МОД обусловлено неравномерностью заполнения камеры сгорания топливом, высокой температурой ($t > 1700^\circ\text{C}$) и сравнительно длительным поддержанием такой температуры, когда поршень находится вблизи верхней мертвой точки – при частотах вращения двигателя ~70...150 мин⁻¹.

Как показано на рис. 2, температура 1700...1900...1700 °С поддерживается в цилиндре около 0,032 секунды. Снижение температуры продуктов сгорания от 1900 до 450 °С составляет примерно 0,213 секунды, т. е. имеет место ее стремительное падение, в результате чего монооксид азота «закаляется» и не реагирует с кислородом, чем и обуславливается доминирующее количество NO (~95 % от общего количества NO_x) в отходящих газах. Иначе образовывался бы диоксид NO₂ в соответствии с реакцией по уравнению (2).

В современных МОД с электронными системами управления подачей топлива (углами $\varphi_{\text{о.в}}$, $\varphi_{\text{з.в}}$ и, следовательно, $\varphi_{\text{в.т}}$), газоразпуском и воздухоподачей ($\varphi_{\text{о.к}}$ и $\varphi_{\text{з.к}}$) имеется возможность настраивать двигатель должным образом и оперативно, при разных нагрузках, изменять зависимость $t = f(\varphi)$, снижая пик максимальной температуры, и уменьшать воздухоподачу, снижая количество кислорода в камере сгорания, т. е. реализуя в той или иной степени цикл Миллера. Все это – с целью уменьшения количества оксидов азота до установленных норм. При этом неизбежно падение КПД двигателя.

Понизить максимальные температуры цикла при $\varphi = 10...30^\circ$ можно непосредственным впрыском воды в цилиндр двигателя, аналогично впрыску топлива, например, параллельно с ним, хотя не исключается и перед впрыском топлива. Вода, впрыскиваемая отдельно от топлива при движении поршня вниз в фазе весьма интенсивного сгорания топлива, подогревается, полностью испаряется, а образовавшийся водяной пар значительно перегревается, что схематично показано на рис. 3. Таким образом, впрыск воды снижает температуру, в результате чего и уменьшается количество NO_x.

Условный процесс отбора теплоты от продуктов сгорания изображен на рис. 3 линией 1–2–3–4. Процесс 0–1 – сжатие воды в насосе высокого давления, например, до $p = 1100$ бар. Процессы: 1–2 – подогрев воды до кипения; 2–3 – испарение; 3–4 – перегрев паров до температуры в цилиндре при давлении $p_{\text{max}} = 150$ бар; 4–5 и 5–6 – снижение температуры паров

при расширении в цилиндре до открытия газовыпускного клапана и, соответственно, при продувке цилиндра; 6–7 – расширение с понижением температуры в газовой турбине турбокомпрессора (ТК). Кроме того, на этом рисунке указаны параметры воды в характерных точках (энтальпии h , энтропии s , давления в барах и температуры в °C), а также параметры критического состояния ($p_{кр}$, $t_{кр}$, $h_{кр}$, $s_{кр}$).

На выходе из ТК (точка 7, рис. 3) энтальпия впрыснутой воды в виде пара составляет $h_7 = 3094$ Дж/г,

а на входе в цилиндр (точка 1) – $h_1 = 327$ Дж/г. Таким образом, в результате впрыска воды с отходящими газами в окружающую среду отводится значительное количество теплоты – из расчета на 1 г впрыснутой воды $q = h_7 - h_1 = 3094 - 327 = 2767$ Дж/г. В силу этого, а также из-за более низкого значения t_{max} КПД МОД при непосредственном впрыске в цилиндр воды снижается, следовательно, уменьшение количества NO_x сопровождается ростом расхода топлива. Согласно данным компании Wärtsilä количество впрыскиваемой

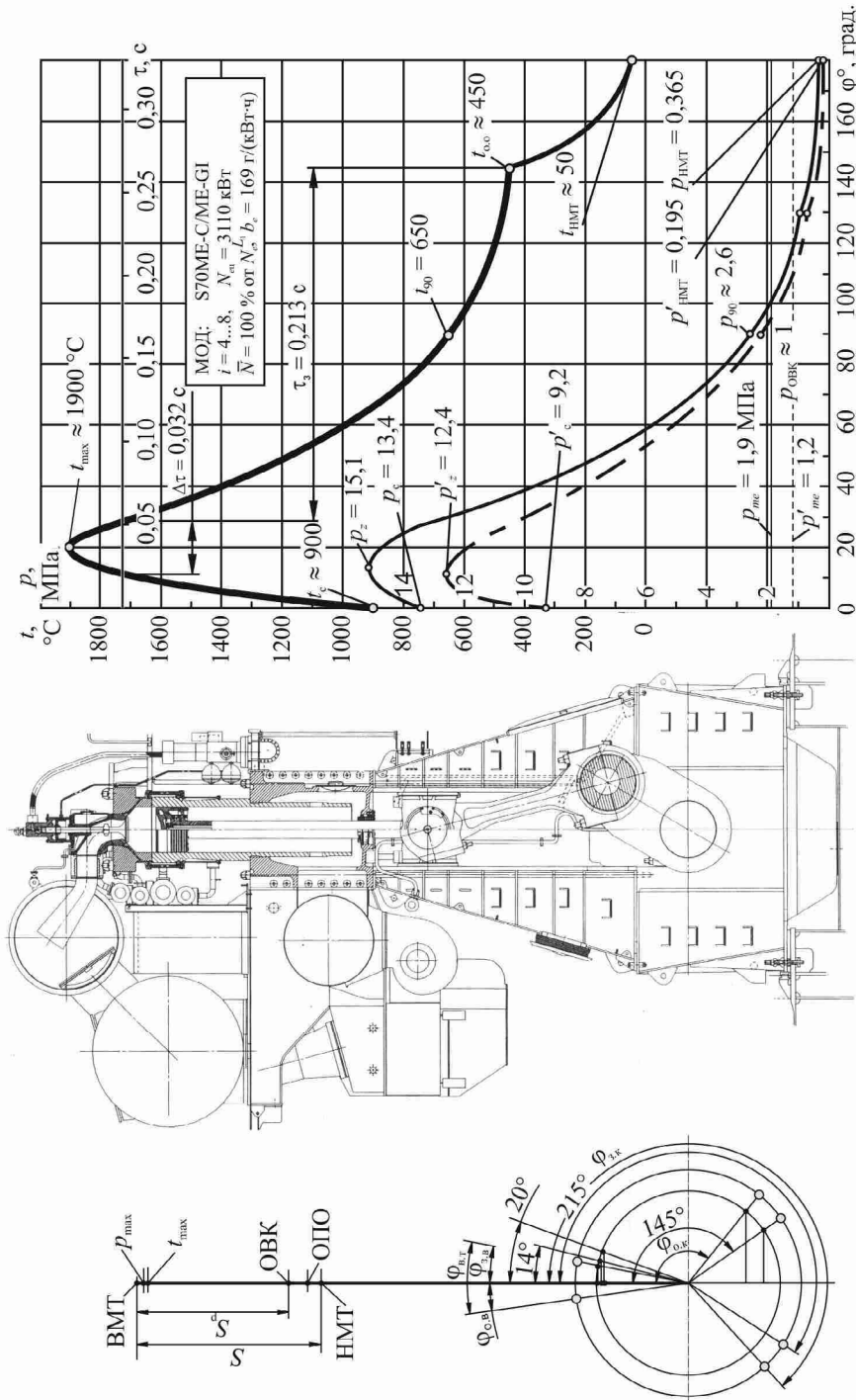


Рис. 2. Температура t и давление p в цилиндре двигателя S70ME-C/ME-GI в зависимости от угла поворота коленчатого вала

воды может достигать 100 % по отношению к топливу. При водотопливном соотношении 70 % достигается снижение NO_x от 16 до 8 г/(кВт·ч), однако имеет место потеря топливной экономичности двигателя RT-flex на 5 г/(кВт·ч).

В условиях возрастающих, все более жестких требований к экологическим показателям судовых дизелей и СЕУ в целом ведущие разработчики и производители МОД и проектировщики судовых пропульсивных комплексов взяли курс на внедрение различных технологий по снижению количества оксидов азота как на единицу получаемой механической работы, так и на единицу

транспортной работы судна или на единицу пройденного пути. За удельные выбросы NO_x , г/(кВт·ч), дизелей, за их соответствие официальным нормам Международной конвенции MARPOL ответственность возлагается на разработчиков дизелей компаний MAN B&W, Mitsubishi и международную группу Wärtsilä NSD. Это, в частности, побуждает их внедрять известные технологии по уменьшению эмиссии NO_x и искать новые пути создания высокоэффективных и экологически безопасных дизелей, о чем свидетельствует международный комплексный проект HERCULES, возглавляемый фирмами MAN и Wärtsilä [3].

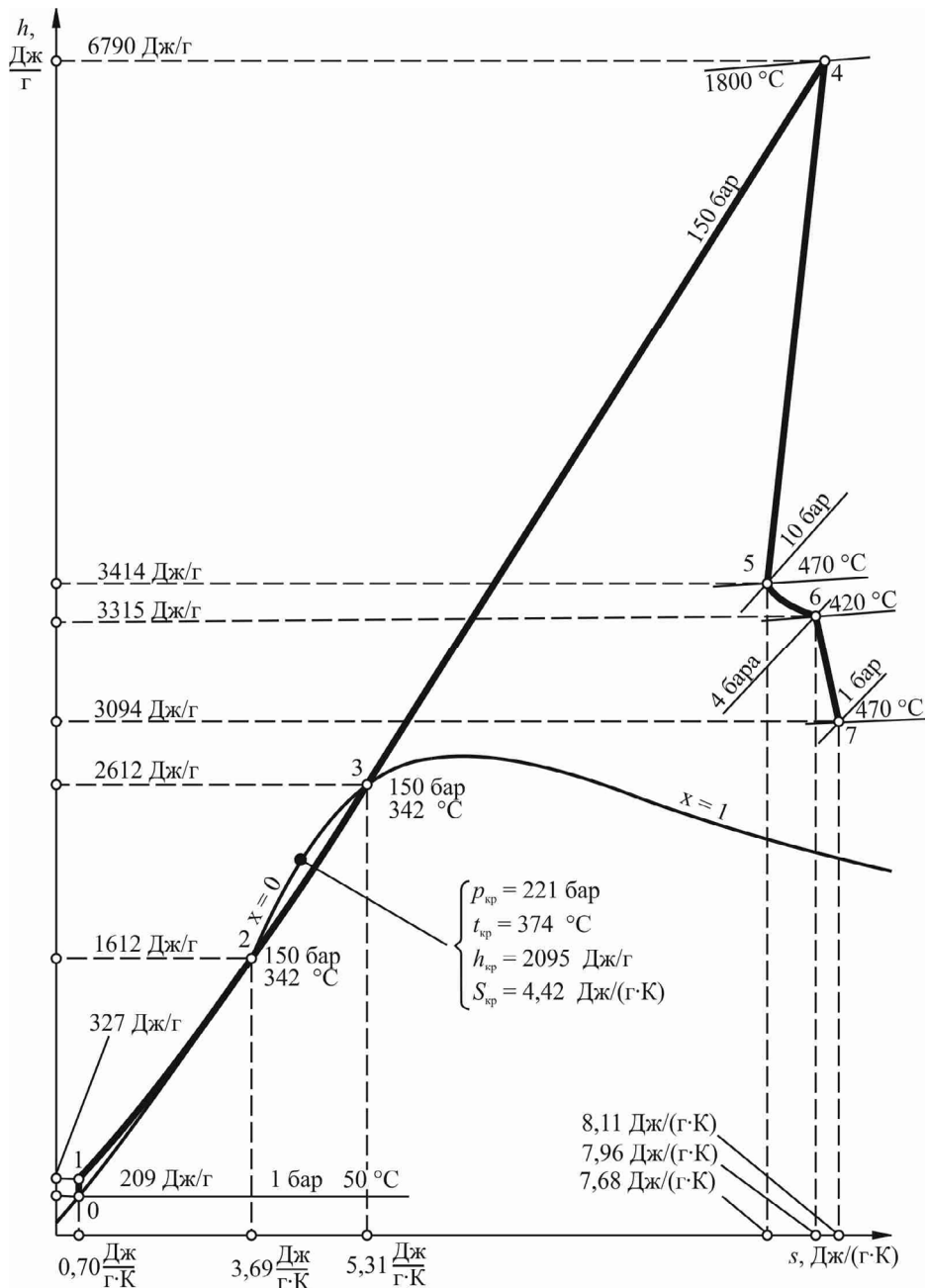


Рис. 3. Подогрев, испарение и перегрев впрыскиваемой в цилиндр МОД воды в координатах энтальпия (h) – энтропия (s)

Современные технологии снижения удельного количества NO_x можно разделить на «внутренние меры» и «внешние меры». К «внутренним мерам» относятся: оптимизация процессов сгорания, реализация в той или иной степени цикла Миллера, совершенствование конструкции форсунок и поршней и газотурбинного наддува, гибкая система впрыска, эмульгирование топлива и непосредственный впрыск воды в цилиндр двигателя. Гибкое управление впрыском топлива с помощью, например, электронной системы типа Common Rail обеспечивает разные профили подачи топлива, как правило, с поздним впрыском, что снижает среднеинтегральную температуру цикла, а следовательно, и эмиссию NO_x и увеличивает удельный расход топлива. Непосредственный (прямой) впрыск воды (Direct Water Injection – DWI) дает возможность впрыскивать воду в строго определенные моменты, для чего может быть использована полностью независимая вторая система Common Rail с электронным управлением. Это позволяет наилучшим образом снижать температуру в цикле, обеспечивая уменьшение NO_x и сравнительно небольшое падение топливной экономичности.

«Внешние меры» включают в себя дополнительное к ГД то или иное оборудование, обеспечивающее: рециркуляцию части отработавших газов (Exhaust Gas Recirculation – EGR);

очистку отработавших газов от NO_x до допустимого уровня.

Технология EGR предусматривает сначала подачу части отработавших в цилиндрах газов в скруббер (газоочиститель), где благодаря прокачиваемой через него воде газы охлаждаются, очищаются от оксидов серы SO_x и твердых частиц. Затем эти газы электрическим высоконапорным нагнетателем подаются на смешение со сжатым в ТК воздухом. Смесь проходит через охладитель наддувочного воздуха и поступает в ресивер МОД. Таким образом, в камере сгорания кислорода меньше, процесс сгорания топлива протекает медленнее, температура цикла ниже, количество NO_x меньше, расход топлива больше. Согласно экспериментальным данным фирмы MAN B&W при 24%-й рециркуляции выбросы NO_x снижаются почти наполовину, а увеличение расхода топлива составляет 2,4 г/(кВт·ч).

Очистка отработавших газов посредством селективного каталитического восстановления NO_x аммиаком до азота и воды (Selective Catalytic Reduction – SCR) – см. уравнения (3)–(5) – может быть обеспечена на 90 % и более. Из газовойпускного коллектора МОД продукты сгорания поступают в генератор аммиака NH_3 , куда впрыскивается дозированное количество водного раствора мочевины $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ – см. уравнение (6). Образовавшаяся смесь идет в SCR-катализатор, где и происходит разложение NO_x при достаточно высокой температуре газов – для обе-

спечения каталитического процесса. Следовательно, блок SCR встраивается перед входом в турбину ТК.

Более 20 лет назад были введены в эксплуатацию двигателя 6S50MC с системами SRC, обеспечивающие снижение эмиссии NO_x на 95 %, на судах для работы в зоне залива Сан-Франциско. Фирма Wärtsilä для двигателей 7RTA53U применила такие же системы на трех судах, которые были введены в эксплуатацию в 1999–2000 годах. На них эмиссия NO_x составляла около 2 г/(кВт·ч). В апреле 2013 года закончились испытания судового МОД MAN B&W модели ME-GR, который соответствует стандарту Tier III благодаря интегрированной системе рециркуляции отработавших газов. Несмотря на высокую эффективность SCR-технологий по снижению NO_x , они применяются в исключительных случаях из-за больших эксплуатационных расходов, обусловленных высокой ценой мочевины. Снизить эти расходы можно совмещением указанных двух «внешних мер», т. е. используя и рециркуляцию части отходящих газов, и впрыск водного раствора мочевины.

Из изложенного следует, что достигнуть стандарта Tier III – эмиссия NO_x не более 3,4 г/(кВт·ч) – без использования «внешних мер» пока не представляется возможным. А за скорейшее введение этого стандарта у своих берегов выступают США, Канада, Япония и другие страны. На 65-й сессии Комитета по защите окружающей среды ИМО в мае 2013 года Россия выступила с предложением отсрочить до 2021 года введение стандарта Tier III в Балтийском море. Это вызвало жесткое сопротивление указанных стран. Тем не менее было решено отсрочить введение стандарта на 5 лет.

Многолетние исследования и последние разработки по снижению выбросов NO_x от МОД указывают на то, что внедрение известных технологий для этих целей связано с существенными финансовыми затратами и чаще всего сопровождается падением достигнутой термодинамической эффективности дизелей. В связи с этим неизбежно генерирование новых идей, выдвижение перспективных гипотез и на их основе создание более совершенных технологий по снижению эмиссии NO_x .

Как отмечалось выше, велика вероятность того, что образование NO_x в цилиндре происходит в основном вне зоны пламени, т. е. там, где отсутствуют углеводороды или их концентрация незначительна. Следовательно, если распыливать топливо в цилиндре, заполняя им как можно большее пространство камеры сгорания, то, очевидно, уменьшится образование оксидов азота. Этого можно достигнуть, например, дополнительным подогревом топлива после топливных насосов высокого давления до температур гораздо больших, чем 150 °С, что будет способствовать более интенсивному фазовому переходу топлива из жидкости в пар и изменению кинематики струй

и паровых потоков, оставляя все меньше пространство без углеводородов. Иной гипотезой по снижению эмиссии NO_x могут выступать электромагнитная обработка топлива, например, перед форсункой и создание электромагнитных полей в районе камеры сгорания. Это должно осуществляться таким образом, чтобы обеспечивать криволинейный характер топливных струй по направлению к поверхностям, образующим камеру сгорания, – с целью более равномерного распределения углеводородов в фазе интенсивного горения и высоких температур, а следовательно, меньшего образования оксидов азота.

ВЫВОДЫ

1. Образование оксидов азота NO_x , в основном монооксида NO , обусловлено высокими температурами (более 1700 °С) в цилиндрах МОД при углах поворота коленчатого вала 10...30°, значительным пространством в камере сгорания с низкой концен-

трацией углеводородов и сравнительно небольшой частотой вращения.

2. Наиболее действенным в настоящее время способом снижения эмиссии NO_x до 3...5 г/(кВт·ч) и менее является каталитическое восстановление NO_x аммиаком до азота и воды, но это ведет к существенному увеличению эксплуатационных расходов транспортных судов из-за высокой цены мочевины.

3. Известные и реализуемые технологии по снижению эмиссии NO_x до стандартов Tier II и Tier III связаны с усложнением конструкции МОД, дополнительным оборудованием в СЭУ и являются энергозатратными, прежде всего в результате падения достигнутой высокой термодинамической эффективности дизелей.

4. Необходимы новые идеи и гипотезы по снижению эмиссии NO_x , например подогрев топлива значительно выше 150 °С или его электромагнитная обработка перед форсункой МОД.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Аболенский, С. Е.** Расчет процессов образования оксидов азота в цилиндре дизеля [Текст] / С. Е. Аболенский, В. О. Калюжный // V Міжнар. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів, науковців та фахівців НУК «Суднова енергетика: стан та проблеми». – Миколаїв : НУК, 2011. – 316 с.
- [2] **Звонов, В. А.** Исследование механизмов образования оксидов азота в условиях камеры сгорания дизеля [Текст] / В. А. Звонов, М. П. Геренович // Двигатели внутреннего сгорания. – 2008. – № 1. – С. 29–33.
- [3] **Конкс, Г. А.** Современные принципы и направления создания транспортного поршневого двигателя [Текст] / Г. А. Конкс, В. А. Ляшко // Матер. Междунар. науч.-техн. конф. «Двигатель – 2008». – Хабаровск : ТОГУ, 2008. – С. 4–32.
- [4] Проектирование пропульсивной установки судов с прямой передачей мощности на винт [Текст] : учеб. пособие / В. П. Шостак, В. И. Гершаник, В. П. Кот, Н. С. Бондаренко ; под ред. В. П. Шостака. – Николаев : УГМТУ, 2003. – 500 с.

© В. П. Шостак, А. Ю. Манзюк

Надійшла до редколегії 12.04.13

Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК
д-р техн. наук, проф. *Б. Г. Тимошевський*

Статтю розміщено у Віснику НУК № 3, 2013