

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ НА ПРОТЕКАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА

Литвиненко В.П., Крючкова Е.Н., Ландиков Ю.В.

Азовский морской институт
Национального университета «Одесская морская академия»
ул. Черноморская, 19, 87517, г. Мариуполь
jltinski@gmail.com

В статье выполнен анализ конструктивных и технологических особенностей судовых дизелей с позиций влияния на условия образования оксидов азота в цикле их работы. Отмечена взаимосвязь между продолжительностью периода эмиссии оксидов азота и временами протекания фаз сгорания топливно-воздушной смеси с учетом геометрических соотношений цилиндропоршневой группы. *Ключевые слова:* оксид азота, эмиссия, фазы сгорания топлива, показатель характера сгорания, международная конвенция.

Вплив конструктивних і технологічних особливостей суднового дизеля на протікання процесів утворення оксидів азоту. Литвиненко В.П., Крючкова О.М., Ландиков Ю.В. У статті виконано аналіз конструктивних і технологічних особливостей судових дизелів з позицій впливу на умови створення оксидів азоту в циклі їх роботи. Відображено зв'язок між тривалістю періоду емісії оксидів азоту й часом протікання фаз згоряння паливно-повітряної суміші з урахуванням геометричних співвідношень цилиндропоршневої групи. *Ключові слова:* оксид азоту, емісія, фази згоряння палива, показник характеру згоряння, міжнародна конвенція.

The influence of structurally technological features of the board diesel engine on the course of the nitrogen oxides formation. Lytvynenko V., Kriuchkova O., Landykov Yu. Analysis of the structurally technological features of ship diesel engines was carried out in terms of the influence on the formation nitrogen oxides in the working cycle. It was noted the connection between the duration of nitrogen oxides emission period and the duration of the fuel-air mix combustion phases due to geometric balance of the cylinder-piston group. *Key words:* nitrogen oxides, emission, fuel combustion phases, combustion indicator, international convention.

Постановка проблемы. Широкое использование поршневых двигателей внутреннего сгорания на судах торгового морского флота, работающих в преобладающем большинстве на тяжелых видах топлива, привело к необходимости повышения качества их работы в части сокращения выбро-

сов вредных веществ в атмосферу, содержащихся в выхлопных газах. В этой связи в мировую практику эксплуатации морского флота через посредство изменений в конвенции Марпол 73/78 введены нормативные ограничения относительно состава веществ в выхлопных газах, включая оксиды азота, в зависимости от числа оборотов судовых дизелей [1]. Районы плавания судов, где отмечаемые требования выражаются в наиболее категоричной форме, за счет использования инспекционных проверок получили названия Европейских портов и обозначаются на картах маршрутов следования SECA area (рис. 1).

Учитывая сложившиеся тенденции в мировой практике, можно отметить значимость обозначенной проблемы как в эксплуатации судов морского флота, так и в части разработки конструктивно-технологических решений, связанных с протеканием внутрицилиндровых процессов в цикле работы дизеля.

Цель статьи – исследование кинетики образования оксидов азота в период работы судового дизеля, в зависимости от конструктивных и эксплуатационных параметров, посредством определения формальных взаимосвязей с количественными показателями выбросов оксидов азота.

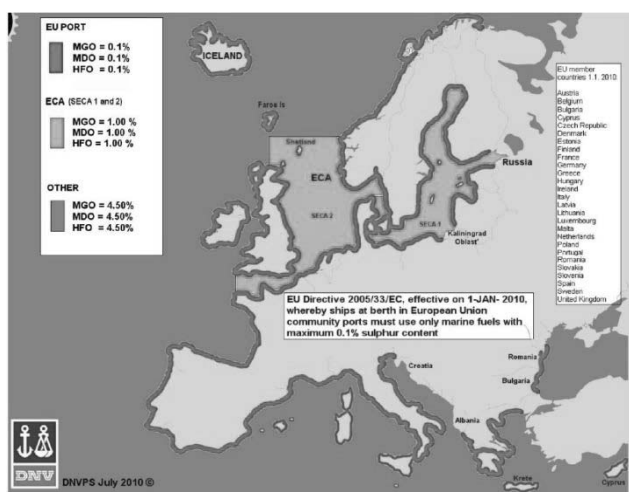


Рис. 1. Схема зон контроля над выбросами вредных веществ в атмосферу

Изложение основного материала. В современных условиях рассматриваемую проблему решают использованием локальных методов как в период эксплуатации судов, так и при разработке судовых дизелей. В эксплуатации основной акцент делается на применении качественных топлив и контроле над содержанием дизелей, в соответствии с требованиями технической документации производителя. В то же время производители дизелей используют конструктивные решения, связанные с нейтрализацией вредных веществ в выхлопных газах. В частности, такие решения предусматривают использование трехкомпонентного каталитического нейтрализатора; рециркуляцию выхлопных газов, что приводит к возрастанию дымности; уменьшению угла опережения подачи топлива, которое приводит к снижению экономических показателей. Известны и другие решения, которые, однако, еще в недостаточной степени исследованы и апробированы на практике. Примером таких решений является использование водотопливных эмульсий и природного газа в качестве основного топлива. В целом все решения, направленные на снижение выбросов в атмосферу, могут быть разделены на три условные группы: 1. Совершенствование конструкции дизелей с целью повышения эффективности процессов сгорания топливовоздушной смеси; 2. Применение каталитических нейтрализаторов и других средств очистки отработавших газов; 3. Использование топлив высокой степени очистки.

В ходе исследования установлена явная недостаточность критериев оценки эффективности экологических показателей, которые могут быть относительно просто использованы в практике эксплуатации судовых дизелей.

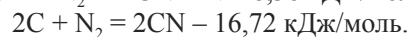
В теоретическом контексте рассматриваемой проблеме посвящено значительное количество работ, однако наиболее значимыми и в определенном смысле основополагающими являются работы Я.Б. Зельдовича и С. Фенимора [2; 3].

В этих работах рассматривается так называемая термическая теория образования оксидов азота, которая в краткой форме излагается в следующих постулатах: 1. Окисление азота происходит за фронтом пламени в зоне продуктов сгорания; 2. Выход оксидов азота определяется максимальной температурой горения, концентрацией азота и кислорода в продуктах сгорания и не зависит от химической природы топлива, участвующего в реакции; 3. Окисление азота происходит по цепному механизму. Скорость процесса определяется реакцией взаимодействия атомарного кислорода с молекулой азота. Энергетический барьер этой реакции складывается из двух составляющих – энергии, требующейся для образования одного атома кислорода, и энергии активации реакции атома кислорода с молекулой азота. Таким образом, энергия активации определяется соотношением: $E = 494/2 + 314 =$

561 кДж/моль ; 4. Скорость образования NO определяется, главным образом, концентрацией атомарного кислорода и константой скорости прямой реакции: $V_{\text{NO}} = 2K_1 C_{\text{O}} C_{\text{N}_2}$; 5. Выход оксидов азота зависит от скорости охлаждения продуктов сгорания; 6. В «бедных» смесях выход NO определяется максимальной локальной температурой сгорания, т.е. кинетикой ее образования, в то время как в «богатых» смесях выход NO перестает зависеть от максимальной температуры сгорания и определяется кинетикой разложения образовавшихся оксидов азота; 7. Концентрация оксидов азота не превышает равновесную концентрацию при максимальной локальной температуре сгорания; 8. Неравномерное распределение температуры в зоне продуктов сгорания заметно влияет на выход NO при горении «бедных» смесей и слабо – при горении «богатых» смесей.

Наряду с «термическими» оксидами азота замечены факты быстрого образования оксидов: за время 10^{-4} с в процессе сгорания стехиометрической метановоздушной смеси и в других реакциях. По этой причине они были названы «быстрыми». «Быстрые» оксиды азота образуются непосредственно во фронте ламинарного пламени на участке, составляющем 10% ширины фронта пламени. Процесс образования начинается уже у передней границы фронта пламени в области температур около 1000°К .

Механизм образования таких оксидов предложен С. Фенимором: молекулы азота связываются радикалами CH_2 , CN и C_2 в реакциях с очень малыми энергетическими затратами.



Далее атомы азота взаимодействуют с OH или O_2 , что ведет к дополнительному образованию NO. Цианосодержащие компоненты окисляются кислородосодержащими веществами. Указанный механизм получил подтверждение при исследовании образования NO в очень богатых углеводородовоздушных смесях (коэффициент избытка воздуха меньше или равен 0,65). Выход «быстрых» оксидов азота мало зависит от температуры горения и сильно от соотношения топливо-воздух.

Источниками образования оксидов азота в отработавших газах, по-видимому, являются и азотсодержащие соединения, входящие в состав топлив. Топочный мазут содержит 0,3–0,5% азота; моторное топливо 0,12–13% азота; дизельное топливо 0,007–0,01% азота.

В дистиллятных топливах азот присутствует в виде аминов и гетероциклических соединений. Эти вещества распадаются в процессе пиролиза в предпламенной зоне до азотсодержащих соединений с малой молекулярной массой: NH_3 ; HCN ; CN и других, которые, в свою очередь, реагируют с кислородосодержащими веществами с образованием NO.

Параллельно протекает процесс образования N_2 , однако процесс его образования незначителен. Окисление протекает достаточно быстро, за время, соизмеримое со временем горения. Выход оксидов азота зависит от состава горючей смеси: для бедных и стехиометрических смесей выход заметно выше, чем для богатых, и мало зависит от температуры, в отличие от окисления атмосферного азота.

Механизмы образования «быстрых» оксидов азота и оксидов из топливных смесей близки по своей природе [3; 4].

Для правильного описания закономерностей эмиссии NO_x , по мнению авторов, необходимо в первую очередь учитывать неоднородность состава топливоздушной смеси в камере сгорания, т.е. принимать во внимание кинетику процесса смешения, разделяя ее по времени структурно выделенных процессов. Следует учитывать продолжительность протекания процессов, связанных со сгоранием топливоздушных смесей.

К временам, определяющим процесс горения и эмиссию вредных веществ относят время испарения или горения капель топлива, пропорциональное квадрату времени диффузии – $T_{исп}$; время смешения паров горючего с продуктами сгорания в зоне обратных токов – $T_{см}$; время смешения горючего газа и продуктов сгорания с воздухом – $T_{смв}$; время задержки воспламенения и горения гомогенной топливоздушной смеси – $T_{ис}$; время окисления азота – T_{NOx} .

Эксперимент показал, что для сгорания распыленного жидкого топлива время смешения горючего газа и продуктов сгорания с воздухом – $T_{смв}$ приблизительно равно 10 мс при давлении $P=10$ МПа и температуре $T=700^\circ K$, $T_{смв} \approx 10$ мс. Это время – $T_{смв}$ гораздо больше времени протекания химических процессов, связанных с задержкой воспламенения и горения смесей – $T_{ис} = (0,13 \div 0,40)$ мс. Скорость смешения много меньше скорости химических реакций. Процесс горения распыленного жидкого топлива подобен турбулентному диффузионному горению. В этом случае NO образуется в значительном количестве только когда T_{NO} меньше $T_{смв}$, что выполняется при условии когда эквивалентное отношение топлива и воздуха – α_ϕ в первичной зоне сгорания находится в пределах $0,95 \div 1,0$.

Время испарения и горения капель топлива – $T_{исп}$ зависит от размера капель топлива и для стехиометрических смесей, в зависимости от диаметра капель варьирует от 9,8 мс для капель диаметром 150 мкм до 0,2 мс для капель диаметром 10 мкм.

Экспериментально путем варьирования топлив, параметров камер сгорания и режимов сгорания показано, что в случае сгорания распыленного жидкого топлива индекс эмиссии оксидов азота может быть определен по эмпирическому выражению (1).

$$I_{ЭNOx} = \frac{0,73T_{смв}}{(T_{NO} + 0,1T_{исп})} + 0,2. \quad (1)$$

С учетом результатов теоретических исследований в практику проектирования дизелей и их эксплуатацию привносятся некоторые рекомендации, к которым, например, можно отнести уменьшение времени испарения и горения капель топлива за счет лучшего его распыливания; сокращение времени смешивания топлива с воздухом, что приводит к возрастанию скорости выгорания смеси; предварительное смешение топлива с воздухом перед подачей его в камеру сгорания. Однако большая часть из них в малой степени согласуется с особенностями конструкции и эксплуатации двигателей. Одной из причин, приведших к такому положению, по-видимому, является отсутствие должной теоретической проработки вопроса на стыке особенностей образования оксидов азота и внутрицилиндровых процессов. По этой причине нами предпринята попытка подвергнуть анализу приведенные особенности образования оксидов азота на предмет возможной разработки некоторой теоретической основы, на принципах сопоставления рассматриваемых процессов.

Такой подход нами объясняется противоречивостью суждений, поясняющих механизм образования оксидов азота. В одном случае, по Зельдовичу, образование оксидов не зависит от химической природы топлива, в другом же случае делается акцент на том, что источником образования оксидов являются азотсодержащие соединения, входящие в состав топлива. Хотя в обоих случаях не отрицается первичность влияния температуры на условия протекания реакций.

С точки зрения кинетики процессов сгорания в цилиндрах двигателя наибольший интерес, на наш взгляд, представляют особенности образования оксидов за фронтом пламени в зоне продуктов сгорания. Здесь значимыми оказываются скорость образования оксидов, состав топливной смеси (бедная и богатая смеси), условия диссоциации – распыления и горения, а также длительность горения и эмиссии вредных веществ.

Такая особенность подхода к рассматриваемому вопросу объясняется тем, что, как это следует из результатов исследований, сгорание топливоздушной смеси в современном дизеле протекает в условиях значительной турбулентности, которая достигается за счет использования различных конструктивных решений. Это обстоятельство исключает возможность рассматривать образование оксидов в некотором относительно четко обозначенном фронте пламени. Да и сам фронт пламени крайне сложно здесь обозначается. Сгорание топливоздушной смеси в цилиндре двигателя происходит в некотором ограниченном объеме, точнее сказать, в части объема цилиндра, в пространстве между днищем поршня и крышкой цилиндра. Причем пламенем покрывается от 25 до 65 процентов площади днища поршня [5]. Это свойство распространения

пламени в цилиндре двигателя, по-видимому, может быть объяснено, по меньшей мере, двумя специфическими особенностями. Образованием комплексных волн за счет отражения звукового и светового потоков от стенок втулки цилиндра, а также за счет возникновения электромагнитного поля, образуемого за счет ионизации пламени, взаимодействующего с катализатором, в роли которого выступают детали цилиндропоршневой группы. Таким образом, применительно к дизелю можно говорить о наличии условий образования оксидов не во фронте пламени, а в пространстве между днищем поршня, втулкой и крышкой цилиндра. Безусловно, в этой области присутствуют зоны с температурой более 1000°K и наблюдаются значительные перепады температур, в которых характерно образование оксидов.

Не менее важным аспектом является продолжительность эмиссии вредных веществ и сгорания топлива в цилиндрах двигателя. Как следует из выше приведенных данных, время эмиссии определяется значениями порядка 10^{-3} – 10^{-4} с. Причем определяющим показателем здесь является период диффузии, протекание которой характеризуется углом опережения впрыска топлива, или, как это принято обозначать, продолжительностью индукции. Так что можно отметить, что сокращением периода индукции достигается и понижение вероятности возникновения оксидов азота. В этом случае нам потребуется организовать процессы воспламенения топливовоздушной смеси в цилиндре двигателя у верхней мертвой точки, что и предусмотрено в идеальном цикле Дизеля. К сожалению, однако, здесь мы вынуждены констатировать, что реализация такого идеального цикла Дизеля до настоящего времени в современных двигателях еще не реализуется, хотя и имеются определенные практические наработки в этой области [6]. В то же время решение такой задачи может быть поставлено в теоретическом контексте.

Наиболее благоприятным результатом решения такой задачи является соблюдение условия: $t_s \geq t_o \geq t_u$, где t_s , t_o , t_u – соответственно, продолжительность эмиссии, диффузии и индукции, с.

На первый взгляд, приведенное соотношение представляется некорректным, поскольку очевидным является факт того, что эмиссия вредных веществ не может происходить вне связи с диффузией и является составной частью диффузии. Но это противоречие устраняется, если принять во внимание, что сама диффузия оказывается регулируемой за счет использования технических решений, позволяющих влиять на условия, в которых она протекает.

Примером такого решения могут послужить результаты работы [8], где обозначена так называемая линия разрыва в системе поршень-цилиндр, продолжительность проявления которой установлена в обозначенных интервалах времени. При этом наличие линии разрыва позволяет вводить в полость цилиндропоршневой группы дополнительное коли-

чество воздушной смеси при незначительных затратах энергии. И таким образом влиять на кинетику образования оксидов азота.

Отметим продолжительность периода эмиссии по отношению к общему времени процесса сгорания топлива в виде соотношения:

$$T_{исп} + T_{см} + T_{смв} + T_{нс} + T_{NOx} = T_{проц}. \quad (2)$$

Заметим, что нами ранее был сделан вывод в отношении времени протекания цикла в дизеле [7], который выражен в виде зависимости:

$$T_u = 78,5 \frac{D^2 H P_e}{N_e}, \quad (3)$$

где D – диаметр цилиндра, м;

H – ход поршня, м;

P_e – среднее эффективное давление, МПа;

N_e – мощность двигателя, кВт.

Таким образом, при допущении равенства времени, при котором осуществляется цикл и период времени эмиссии, можно отметить обусловленность образования оксидов азота спецификой конструктивных параметров двигателя и получить зависимость, отображающую продолжительность образования оксидов азота в цикле работы дизеля.

Сопоставив выражение (2) и (3), имеем:

$$78,5 \frac{D^2 H P_e}{N_e} = T_{исп} + T_{см} + T_{смв} + T_{нс} + T_{NOx}. \quad (4)$$

В ходе исследования обращено внимание на результаты работ И.И. Вибе, которым получена зависимость, позволяющая осуществлять расчет длительности ($T_{нс}$) сгорания топливовоздушной смеси в цикле работы дизеля [5].

$$T_{нс} = 9,967^{\frac{1}{m+1}} t_{1/2}, \quad (5)$$

где m – показатель характера сгорания, параметр, отображающий характер изменения по времени относительной плотности эффективных центров в процессе сгорания. Для тяжелого топлива $m = -0,16$ [5].

$$m = \frac{x_z}{\ln(t_z/t_{1/2})}, \quad (6)$$

где $t_{1/2}$ – период полусгорания, с.

t_z – общая продолжительность реакции сгорания, с.

x_z – доля выгоревшего топлива к моменту окончания реакции сгорания. К расчетам принимается равной 0,999 [5].

Преобразовав выражение (4) и воспользовавшись выражением (5), выразим длительность образования оксидов азота в зависимости от параметров двигателя с учетом длительности сгорания топливовоздушной смеси.

В явном виде длительность образования оксидов азота определится из соотношения:

$$T_{NOx} = 78,5 \frac{D^2 H P_e}{N_e} - 9,967^{\frac{1}{m+1}} t_{1/2} - T_{исп} - T_{см} T_{смв}.$$

Главные выводы. Полученные в ходе исследования зависимости обеспечивают возможность вза-

имно увязать теоретические модели описания термодинамических циклов с процессами, наблюдаемыми при работе дизелей, поскольку в эксплуатации основными параметрами, подлежащими контролю в эксплуатации, являются мощность и среднее эффективное давление. Использование зависимостей позволяет учесть характер влияния геометрических соотношений цилиндропоршневой группы на процессы образования оксидов азота при проектирова-

нии за счет предварительных расчетов и возможной выработки решений, направленных на снижение выбросов отработавших газов в атмосферу.

Перспективы использования результатов исследования. Благодаря полученным выражениям, представляется возможным осуществлять дальнейшие исследования условий образования оксидов азота на некотором новом уровне, в том числе с учетом режимов работы судового дизеля.

Литература

1. MARPOL 73/78 part 6.
2. Зельдович Я.Б., Садовников П.Я., Франк-Каменецкий Д.А. Окисление азота при горении. Москва-Ленинград: Изд-во АН СССР, 1947. 145с.
3. Fenimore C.P. Formation of nitric oxide from fuel nitrogen in ethylene flames. Combustion and Flame, 1972. V. 19. P. 289.
4. Бурико Ю.Я. Эмиссии оксидов азота камерами сгорания. ЦИАМ, 1986. Труды ЦИАМ. № 225.
5. Вибе И.И. Новое о рабочем цикле двигателей. Скорость сгорания и рабочий цикл двигателя. Москва: ГНТИ Машиностроительной литературы. 1962. 269 с.
6. Возницкий И.В. Современные судовые среднеоборотные двигатели: учебник. Санкт-Петербург: КСИ, 2005. 147 с.
7. Литвиненко В.П., Крючкова Е.Н., Житаренко В.М. Параметрические особенности адаптивности судового дизеля. Сборник научных трудов. Мариуполь: АМИ ОНМА, 2011. 6 с.
8. Литвиненко В.П. Оценка скорости потока газов в системе поршень-цилиндр. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія «Нові рішення в сучасних технологіях» / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». Харків: НТУ «ХПІ», 2018. № 16 (1292). 200 с.