

Научная статья

УДК 629.12: 621.43

DOI 10.46845/1997-3071-2022-66-153-162

### Анализ образования оксидов азота в двухтопливном двухтактном двигателе

Лариса Юрьевна Волкова<sup>1</sup>, Кирилл Сергеевич Дорош<sup>2</sup>

<sup>1, 2</sup>Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

<sup>1</sup>volkova0969@mail.ru

<sup>2</sup>kirill.dorosh@klgtu.ru

**Аннотация.** В статье рассмотрены особенности устройства и функционирования системы газоподачи в двухтактные двигатели внутреннего сгорания на примере системы впрыска газа под высоким давлением от компании MAN B&W. Обозначены главные методики использования газа в качестве основного вида топлива для танкеров-газовозов. Детально описан процесс распределения отпарного газа на судовых потребителях посредством использования многоступенчатых поршневых компрессоров высокого давления. Указаны основные отличия систем двигателей с впрыском газа от обычных электронных двигателей серии ME-C. Приведен анализ механизмов образования оксидов азота, представлена методика расчета посредством интегрального уравнения, применение которого является фундаментальным для последующего использования в математических моделях расчета для двухтопливных двигателей. Рассмотрена расширенная термическая модель формирования оксидов азота (модель Зельдовича), выведены формулы расчета констант скорости реакции для механизма Зельдовича. На основании указанных формул и уравнений C-O-H, состоящих из окисления и реакций диссоциации водорода и кислорода, получено уравнение равенства системы, из которого при уточнении отношения концентрации оксида азота к его равновесному значению и скоростей реакции выведено интегральное уравнение для расчета количества оксидов азота. Отражены результаты многозонного расчета оксидов азота при различных нагрузках двигателя MAN 6S70 ME-GI (25, 50, 75, 100 %) на двухтопливном и однотопливном режимах. Показано, что наибольшие выбросы производятся в момент запала пилотного (воспламеняющего) топлива.

**Ключевые слова:** двухтопливный двигатель, оксиды азота, двухтактный двигатель, танкер-газовоз

**Для цитирования:** Волкова Л. Ю., Дорош К. С. Анализ образования оксидов азота в двухтопливном двухтактном двигателе // Известия КГТУ. 2022. № 66. С. 153–162.

Original article

## NO formation analysis in a dual fuel two stroke engine

Larisa Yu. Volkova<sup>1</sup>, Kirill S. Dorosh<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

<sup>1</sup>volkova0969@mail.ru

<sup>2</sup>kirill.dorosh@klgtu.ru

**Abstract.** This article shows basic features of the gas supply system in two-stroke dual-fuel engines with a high-pressure gas injection system from MAN B&W. The main methods of using gas as the main fuel for LNG tankers have been considered. Distribution of boil-off gas to ship consumers through the use of high-pressure multi-stage reciprocating compressors is described. The main differences between gas injection engine systems and conventional electronic engines of the ME-C series are indicated. The article presents the analysis of the mechanisms of nitrogen oxides formation; a calculation method is presented using an integral equation. An extended thermal model for the formation of nitrogen oxides (the Zeldovich mechanism) has been considered, formulas for calculating the reaction rate constants for the Zeldovich mechanism have been developed. According to the equation, when refining the ratio of the nitrogen oxide concentration to its equilibrium value and the reaction rates, an integral equation has been obtained for calculating the amount of nitrogen oxides. The paper shows the results of the multi-zone calculation of nitrogen oxides at various loads of the MAN 6S70 ME-GI engine (25%, 50%, 75%, 100%) in dual-fuel and single-fuel modes. It is shown that the largest emissions are produced at the moment of pilot fuel ignition.

**Keywords:** dual-fuel engine, nitrogen oxides, two-stroke engine, LNG tanker

**For citation:** Volkova L. Yu., Dorosh K. S. NO formation analysis in a dual fuel two stroke engine. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2022;(66):153–162.(in Russ.).

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее важных задач, с которой сталкивается судоходная отрасль сегодня, является соблюдение все более строгих законов о контроле за выбросами, реализуемых в положении Международной морской организация (ММО) (уровень 3 через Приложение 6 Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов и стандарты главы 4 Агентства по охране окружающей среды США).

Фактически, Приложение 6 от ММО ограничивает основные загрязнители воздуха, содержащиеся в выхлопных газах судов, включая оксиды азота (NO<sub>x</sub>), оксиды серы (SO<sub>x</sub>), а также запрещает преднамеренные выбросы озоноразрушающих веществ в зонах контроля выбросов ЕСА.

В 2015 году ММО представила пересмотренное Приложение 6 к МАРПОЛ, в котором разъясняется, что глобальный предел содержания серы будет дополнительно снижен с 3,5 до 0,5 % с 1 января 2020 года, включая дальнейшее сокращение выбросов NO<sub>x</sub> за счет более строгого предела выбросов уровня 3 для двигателей судов в странах ЕС, построенных после 1 января 2016 года.

Вышеуказанные правила ввели в судостроение такие определения, как проектный индекс энергоэффективности (EEDI), план управления энергоэффективностью судна (SEEMP), эксплуатационный показатель энергоэффективности (EEOI), которые, в свою очередь, усилили разработки в направлении снижения расхода топлива и внедрение альтернативных видов топлива.

Новое поколение двигателей может работать как в двухтопливном, так и в чисто дизельном режимах. Однотопливный режим подразумевает использование обычного дизельного или тяжелого низкосернистого топлива, в то время как в двухтопливном режиме основным топливом является газ, к которому подается малый объем запального топлива (дизельного или тяжелого). Использование природного газа позволяет снизить выбросы оксидов азота на 45–85, оксидов серы – на 60–80 %.

Двухтопливные двигатели работают в соответствии с методологией сжигания обедненной смеси, которая значительно снижает пиковые температуры выхлопных газов, что приводит к уменьшению выбросов NOx. В процессе обедненного сгорания воздушно-топливная смесь инициируется впрыскиванием небольшого количества пилотного топлива (менее 1 %), которое воспламеняется, как и в обычном дизельном цикле, давая высокоэнергетический источник воспламенения для основного заряда. Четырехтактные двигатели работают при низком давлении (5–7 бар) со средним эффективным давлением около 25 бар.

Что касается двухтактных двигателей, то их существует два типа: двухтопливные двигатели высокого давления и двухтопливные низкого. Первые работают при давлении около 300 бар, при котором газ впрыскивается во время фазы сгорания, у вторых газовое топливо впрыскивается при давлении 7 бар на стадии сжатия.

Основной фокус данной статьи направлен на анализ процесса сгорания топлива и образования оксидов азота в двухтактном двухтопливном судовом двигателе внутреннего сгорания (ДВС).

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Основным критерием отличия двухтопливных двигателей является технология впрыскивания газообразного топлива. Концепция впрыска низкого давления широко применяется компанией "Вяртсила" как для двухтактных (X-DF, WinGD), так и для четырехтактных двигателей. Газ впрыскивается в процессе такта сжатия, что обеспечивает хорошую смешиваемость с воздухом перед впрыскиванием запального (пилотного) топлива. Данные двигатели известны как двухтопливные ДВС с предварительным смешиванием с фумигационным режимом впрыска.

Другой технологией является впрыск газообразного топлива под очень высоким давлением (ME-GI – Main engine Electronic Gas Injection) в камеры сгорания непосредственно перед впрыском и воспламенением пилотного топлива. Впрыск пилотного топлива начинается раньше, чем впрыск газа в камеру. На рис. 1 показана принципиальная схема циркуляции газа на конвенционном танкере-газовозе дедвейтом 114 тыс. т.

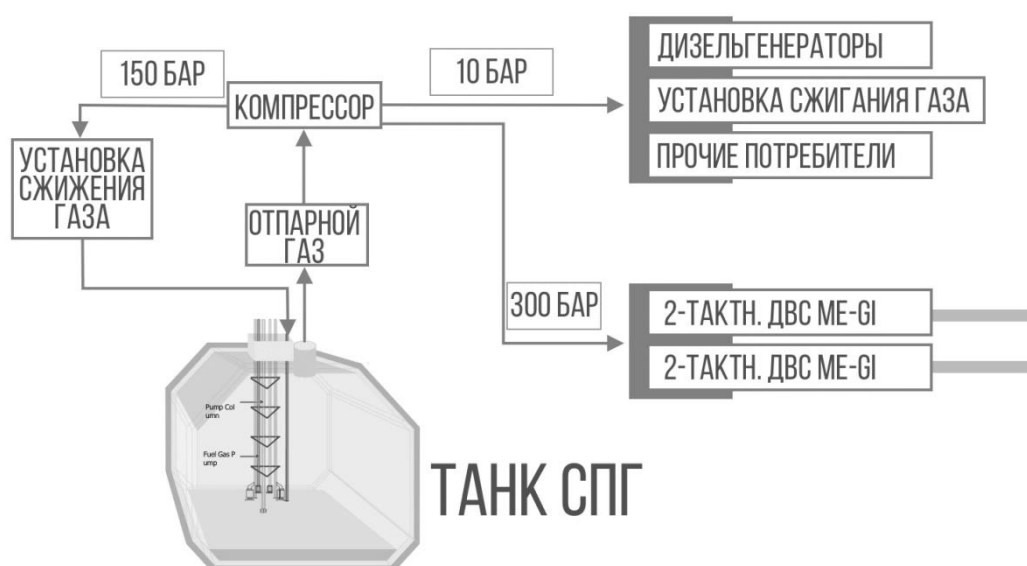


Рис. 1. Принципиальная схема циркуляции газа  
Fig 1. Gas circulation diagram

Газ находится в грузовом танке в жидком состоянии при температуре 159,8 °С, при которой его объем уменьшается в 600 раз по отношению к газообразному состоянию. Ввиду непрерывного теплообмена с окружающей средой происходит постоянное выкипание газа. Отпарной газ скапливается в верхней части танка при давлении от 50 до 350 миллибар и подается на шестиступенчатые компрессоры, с которых, в свою очередь, происходит распределение газа между потребителями – главными и вспомогательными двигателями, а также между установкой сжижения газа и установкой его сжигания. С шестой ступени газ под давлением 300 бар поступает на главные ME-GI двигатели. Концепт двигателей данной серии в сравнении с серией ME-C имеет следующие нововведения:

1. Систему двустенных трубопроводов для подачи газа;
2. Систему обнаружения утечек газа и вентиляции пространства между внешним и внутренним трубопроводом;
3. Систему уплотнительного масла, полностью интегрированную в двигатель, которая подает масло к газовым клапанам, разделяющим контроль подачи топлива и газа;
4. Систему инертного газа;
5. Систему газоанализаторов углеводородных соединений для оповещения об утечке газа из газовых клапанов.

Переключение на работу в однопаливный режим происходит без потери мощности, последнее обновление данной серии двигателей позволяет производить перевод одного цилиндра, оставляя все остальные в работе на газу.

Система газоподачи ME-GI используется для распределения газа высокого давления к каждому блоку клапанов. Газопровод тщательно спроектирован с использованием двустенных трубопроводов, первичная изоляция которых направлена на предотвращение любой утечки в машинное отделение. Пространство вокруг фланцев, клапанов и манифольдов надлежащим образом постоянно вентилируется и контролируется на содержание углеводородных соединений. Клапаны впрыска газа регулируются вспомогательной системой управления маслом. Эта система включает в себя масляную систему гидравлического управления ME и

систему электронного впрыска газа (ELGI) [1], которая подает гидравлическое управляющее масло под высоким давлением к клапану впрыска газа, контролируя синхронизацию и открытие газового клапана. Газ поступает на клапан впрыска через отверстия в крышке цилиндра. В качестве дополнительной системы безопасности установлены уплотнительные кольца для предотвращения утечки газа между крышкой цилиндра и клапаном впрыска газа, а также между корпусом клапана и направляющей шпинделя. Система гидравлического управляющего масла находится под давлением 350–370 бар, что предотвращает потенциальные утечки газа в масляную систему.

При нормальной работе клапан впрыска газа открывается при соответствующем угле поворота коленчатого вала, газ впрыскивается и подается непосредственно в камеру сгорания (рис. 2). Благодаря такой технологии впрыска вероятность попадания несгоревшего газа в подпоршневое пространство двигателя невозможно при правильном своевременном техническом обслуживании. В дополнение ко всему установлена сеть газоанализаторов во впускном ресивере, при срабатывании которых полностью отключается система впрыска газа и производится продувка всей системы инертным газом.

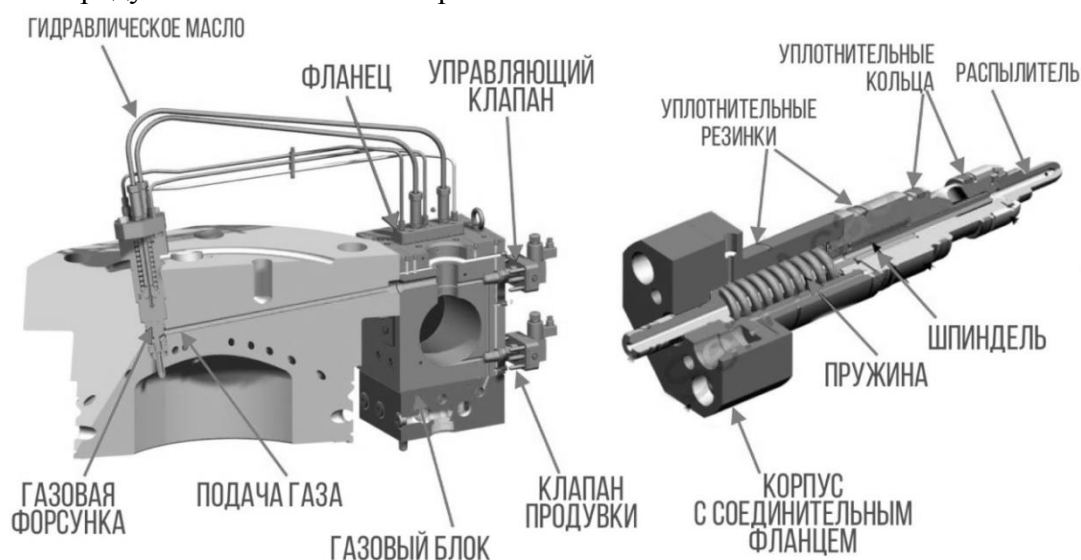


Рис. 2. Устройство системы впрыска газа высокого давления  
Fig 2. Drawing diagram of a high pressure gas injection system

В открытых источниках существуют различные математические модели, описывающие процесс сгорания в двухтопливных ДВС. Ученые Хоунталас и Папагианнакис [2] разработали двузонный метод расчета сжигания пилотного топлива и газового. Предполагается, что все количество газового топлива и воздуха представляет собой однородную среду для впрыска запального топлива. В момент впрыска пилотного топлива рассматривается двузонная модель, в которой температура и давление смеси на каждом этапе впрыска остаются одинаковыми, теплообмен между средами не учитывается. Таким образом, воспламенение газоздушной смеси происходит только после самовоспламенения пилотного топлива. Обе среды разделены границей конической струи, образующейся при впрыске пилотного топлива (рис. 3). После воспламенения среды разделяются тонким фронтом пламени, среда горения распространяется во всех направлениях, захва-

тывая среду газовой смеси. Скорость тепловыделения напрямую зависит от скорости распыления пилотного топлива и от ламинарной скорости сгорания.

В образовании оксидов азота отмечены три метода: термический (механизм Зельдовича), в начале зоны реакции (механизм Фенимора), образование азотосодержащих составляющих горючего материала. Для двигателей внутреннего сгорания используется механизм Зельдовича, по которому оксиды азота образуются в высоких температурах отработанных газов за фронтом пламени [3]. Для детального рассмотрения представим три химические реакции, управляющие образованием оксидов азота:



Скорость изменения концентрации NO записывается следующим выражением (моль/см<sup>3</sup>) [4]:

$$\frac{d}{dt} [NO] = k_1 [O][N_2] - k_{1r} [NO][N] + k_2 [N][O_2] - k_{2r} [NO][O] + k_3 [N][OH] - k_{3r} [NO][H], \quad (4)$$

где  $k_i$  и  $k_{ir}$  – константы скорости реакции для механизма Зельдовича расширенного вида, представленные ниже:

$$k_1 = 1.8 \cdot 10^{14} \exp(-38370 / T), \quad (5)$$

$$k_{1r} = 3.8 \cdot 10^{14} \exp(-425 / T), \quad (6)$$

$$k_2 = 1.8 \cdot 10^{10} T \exp(-4680 / T), \quad (7)$$

$$k_{2r} = 3.8 \cdot 10^9 T \exp(-20820 / T), \quad (8)$$

$$k_3 = 7.1 \cdot 10^{13} \exp(-450 / T), \quad (9)$$

$$k_{3r} = 1.7 \cdot 10^{14} \exp(-24560 / T). \quad (10)$$

Константы выражаются в см<sup>3</sup>/моль · с, индекс  $r$  означает, что скорость обратной реакции постоянна, температура  $T$  выражена в градусах Кельвина.

Для применения уравнения (4) необходимо представить уточнения: C–O–N система находится в равновесии и не нарушается распадом азота N<sub>2</sub>, а концентрация азота изменяется квазистационарным процессом. Первое уточнение означает, что по температуре, давлению и коэффициенту эквивалентности можно рассчитать концентрацию N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, O, OH, H. Второе уточнение показывает, что скорость распада азота равна нулю. Таким образом, получим уравнение:

$$\frac{d[N]}{dt} = k_1 [O][N_2] - k_{1r} [NO][N] - k_2 [N][O_2] + k_{2r} [NO][O] - k_3 [N][OH] + k_{3r} [NO][H] = 0. \quad (11)$$

Сопоставив два уточнения, найдем:

$$\frac{d[NO]}{dt} = \frac{2R_1(1-a^2)}{1+aR_1/(R_2+R_3)}, \quad (12)$$

где  $a$  – отношение концентрации оксида азота к его равновесному значению, при котором не происходит заметных изменений:

$$a = [NO] / [NO]_e, \quad (13)$$

а также  $R_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) – скорости реакции, через которые представлено уточнение о равновесии системы:

$$R_1 = k_1 [O]_e [N_2]_e, \quad (14)$$

$$R_2 = k_{2r} [NO]_e [O]_e, \quad (15)$$

$$R_3 = k_{3r} [NO]_e [H]_e. \quad (16)$$

Таким образом, общее количество оксидов азота считается интегральным уравнением:

$$\bar{x}_{NO} = \int_0^1 x_{NO} dx. \quad (17)$$

В качестве объекта исследования взят двухтактный ДВС компании МАН модельного ряда 6S70 ME-GI, устанавливаемый в двух экземплярах на танкерах-газовозах дедвейтом выше 100 тыс. т. Двигатель работает по технологии впрыска газа под высоким давлением, обладает номинальной мощностью 19 620 кВт и развивает 108 об./мин. на номинальных оборотах [5]. Среднее эффективное давление составляет 20 бар.

На рис. 3–6 представлены результаты многозонного расчета оксидов азота при различных нагрузках двигателя. Пунктирный график показывает равновесную концентрацию NO в зоне горения, в то время как сплошные графики иллюстрируют концентрацию, ограниченную по скорости горения.

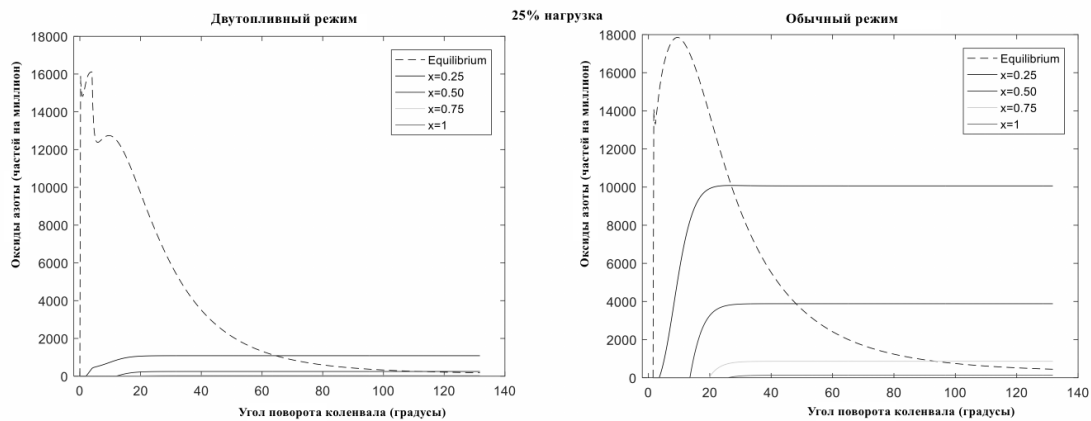


Рис. 3. График образования оксидов азота к положению коленвала на нагрузке 25 %

Fig 3. Diagram of NO formation to crank angle on 25 % load

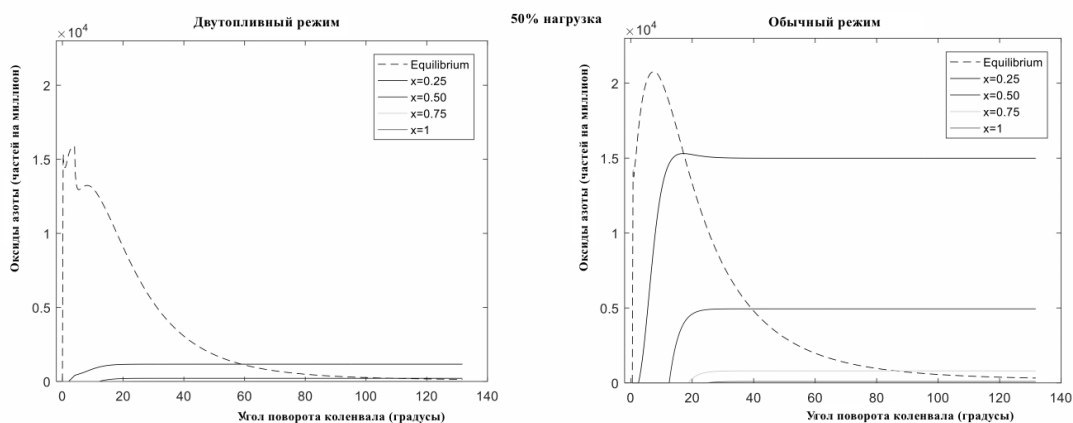


Рис. 4. График образования оксидов азота к положению коленвала на нагрузке 50 %

Fig 4. Diagram of NO formation to crank angle on 50 % load

В двухтопливном режиме пик концентрации оксидов азота приходится на момент старта процесса воспламенения пилотного топлива, затем она резко пада-

ет ввиду постепенного снижения температуры в зоне горения. Существует большая разница в концентрации оксидов азота, ограниченных по скорости горения (при разных массовых долях сгоревшего топлива, от  $x = 0,25$  до  $x = 1$ ), поскольку скорости химических реакций сильно зависят от температуры.

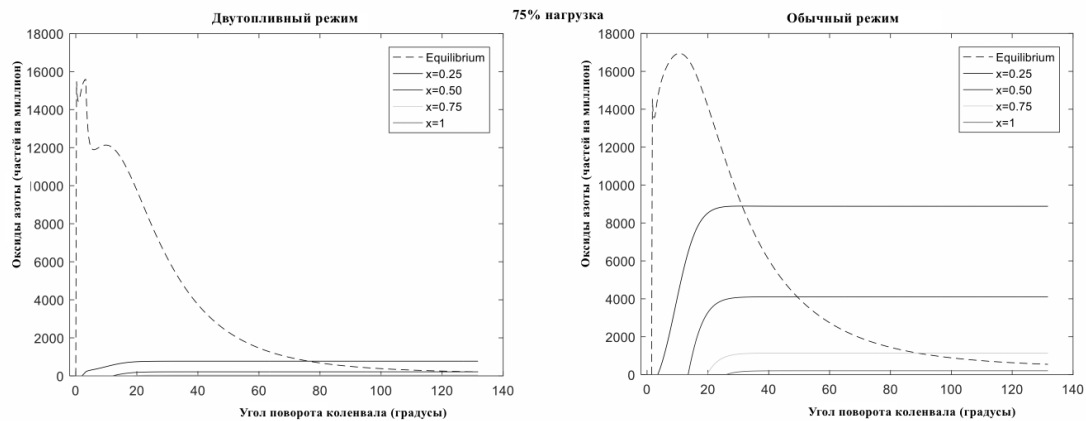


Рис. 5. График образования оксидов азота к положению коленвала на нагрузке 75 %

Fig 5. Diagram of NO formation to crank angle on 75 % load

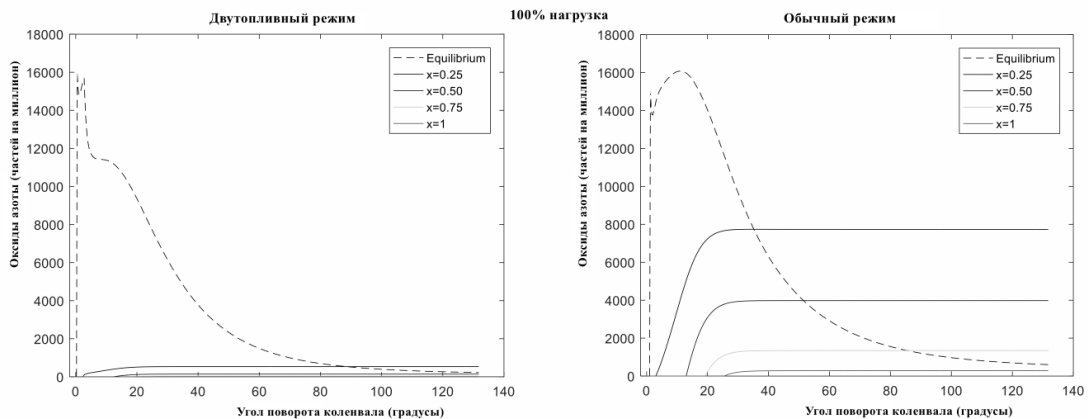


Рис. 6. График образования оксидов азота к положению коленвала на нагрузке 100 %

Fig 6. Diagram of NO formation to crank angle on 100 % load

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В рамках настоящего исследования была проанализирована модель образования оксидов азота в двухтопливных двигателях компании МАН, дано полное описание газоподачи в дизель с момента образования отпарного газа в танках до его поступления в цилиндр.

2. Из представленных графиков видно, что при двух видах топлива двигатель работает при более низких температурах в цилиндрах, что приводит к меньшему образованию оксидов азота. Тепловыделение запального топлива значительно ниже, чем у газа, из-за его предельно малого количества.



3. Образование оксидов азота рассчитывается с учетом механизма Зельдовича после определения температуры в зоне горения. Представленные графики подтверждают, что образование оксидов прямо пропорционально содержанию кислорода и температурам в цилиндре.

#### Список источников

1. Документация по эксплуатации двигателей ME-ГИ: техническая документация доп. Копенгаген: ТУРБО МД, 2017. 53 с.
2. Papagiannakis R., Hountalas D. Experimental investigation concerning the effect of natural gas percentage on performance and emissions of a DI dual fuel diesel engine // *Applied Thermal Engineering*. 2003. V. 23 P. 353–365.
3. Зельдович Я. Б., Садовников П. Я., Франк-Каменецкий Д. А. Окисление азота при горении: учеб. пособие. Москва: АН СССР, 1947. 347 с.
4. Зельдович Я. Б., Воеводский В. В. Тепловой взрыв и распространение пламени в газах: учеб. пособие. Москва: ММИ, 1947. 294 с.
5. Макушев Ю. П., Жигadlo А. П., Волкова Л. Ю. Конструктивные особенности систем подачи топлива современных дизелей: учеб. пособие. Омск: СибАДИ, 2020. 202 с.

#### References

1. Dokumentatsiya po ekspluatatsii dvigateley ME-GI: tekhnicheskaya dokumentatsiya dop. Kopenhagen. TURBO MD, 2017, 53 p.
2. Papagiannakis R., Hountalas D. Experimental investigation concerning the effect of natural gas percentage on performance and emissions of a DI dual fuel diesel engine. *Applied Thermal Engineering*, 2003, vol. 23, pp. 353–365.
3. Zel'dovich Ya. B., Sadovnikov P. Ya., Frank-Kamenetskiy D. A. *Okislenie azota pri gorenii* [Nitrogen oxidation during combustion]. Moscow, AN SSSR Publ., 1947, 347 p.
4. Zel'dovich Ya. B., Voevodskiy V. V. *Teplovoy vzryv i rasprostranenie plameni v gazakh* [Thermal explosion and flame dissipation in gases]. Moscow, MMI Publ., 1947, 294 p.
5. Makushev Yu. P., Zhigadlo A. P., Volkova L. Yu. *Konstruktivnye osobennosti sistem podachi topliva sovremennykh dizeley* [Design features of fuel supply systems of modern diesel engines]. Omsk. SibADI Publ., 2020, 202 p.

#### Информация об авторах

**Л. Ю. Волкова** – кандидат технических наук, доцент кафедры судовых энергетических установок и теплоэнергетики

**К. С. Дорош** – аспирант кафедры судовых энергетических установок и теплоэнергетики

**Information about the authors**

**L. Yu. Volkova** – PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Ship Power Plants and Heat Power Engineering

**K. S. Dorosh** – post-graduate student of the Department of Ship Power Plants and Heat Power Engineering

Статья поступила в редакцию 29.03.2022; одобрена после рецензирования 13.04.2022; принята к публикации 15.07.2022

The article was submitted 29.03.2022; approved after reviewing 13.04.2022; accepted for publication 15.07.2022