

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№ 1 (2022)

Павлодар

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания
№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/WRIX7218>

Бас редакторы – главный редактор

Кислов А. П.

к.т.н., доцент

Заместитель главного редактора

Талипов О. М., *доктор PhD, доцент*

Ответственный секретарь

Приходько Е. В., *к.т.н., профессор*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я., *д.т.н., профессор*
Новожилов А. Н., *д.т.н., профессор*
Никитин К. И., *д.т.н., профессор (Россия)*
Никифоров А. С., *д.т.н., профессор*
Новожилов Т. А., *к.т.н., доцент (Россия)*
Оспанова Н. Н., *к.п.н., доцент*
Нефтисов А. В., *доктор PhD, доцент*
Шокубаева З. Ж. *технический редактор*

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

<https://doi.org/10.48081/THCV4375>

А. М. Достияров¹, С. Б. Садыкова², *Н. Р. Картджанов³

¹Алматинский университет энергетики и связи

имени Гумарбека Даукеева,

Республика Казахстан, г. Алматы;

^{2,3}Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева,

Республика Казахстан, г. Нур-Султан

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ГАЗОВЫХ ТУРБИН НА ЭМИССИЮ NOx. ЧАСТЬ 1

В статье проанализировано влияние параметров потока в камере сгорания на эмиссию NOx. Приводится описание механизмов образования оксидов азота, а также исследуется влияние температуры пламени в камере сгорания на уровень термических и мгновенных NOx. Результаты исследования показывают, что полное устранение образования термических NOx не обеспечивают нулевого уровня NOx, в этом случае остаточным NOx является мгновенные NOx. А также показано, что зависимость термических оксидов азота от температуры является экспоненциальной, а образование мгновенных оксидов азота от температуры имеет линейную зависимость при температуре пламени меньше 1950К. Статья может быть интересна исследователям и специалистам в области теплоэнергетики.

Ключевые слова: оксиды азота, камера сгорания, мгновенные NOx, термические NOx, газовая турбина.

Введение

Сжигание углеводородных топлив всегда сопровождается эмиссией токсичных газов, таких как оксиды азота (NOx) и оксид углерода (CO). Концентрация этих выбросов в основном зависит от организации процесса горения, а другие же выбросы являются относительно постоянными и зависят от вида топлива и его содержания.

Выбросы оксидов азота или NOx (NO+NO₂) в атмосфере воздуха в результате фотохимических реакций с химически активными углеводородами образует озон, который является источником фотохимического смога и

токсичен для человека. Озон снижает функцию легких, что вызывает приступы астмы. Связанное с этим снижение поступления кислорода в кровь приводит к проблемам с сердцем из-за увеличения работы сердца. Выбросы NO_2 также напрямую вредны для человека, вызывая снижение функции легких и связанные с этим проблемы с сердцем. Озон также является мощным парниковым газом (в эквиваленте $\text{CO}_2 \times 2000$ в ppmv), что делает NO_x вторым по негативному воздействию парниковым газом после углекислого. NO_x реагирует в атмосфере с образованием азотной кислоты и, таким образом, способствует повреждению экосистемы кислотными дождями.

CO является продуктом неполного сгорания и определяет эффективность сжигания топлива. Этот газ в организме человека нарушает способность крови доставлять кислород к тканям, вызываются спазмы сосудов, при этом снижается иммунологическая активность человека. Вдыхаемый оксид углерода поступает в кровь, повышает количество сахара в крови, ослабляет подачу кислорода к сердцу.

Следовательно, выбросы NO_x и CO играют важную роль во всех текущих проблемах контроля качества воздуха в окружающей среде и, таким образом, подлежат строгому контролю выбросов регулирующими органами по всему миру.

В нашей стране ограничение по выбросам NO_x в газотурбинных установках составляет 150 мг/м^3 (75 ppm) при эталонном содержании $\text{O}_2=15\%$ [1]. Согласно Европейской директиве о промышленных выбросах от 2016 года [2] эмиссия NO_x не должна превышать 25 ppm или 50 мг/м^3 при $\text{O}_2=15\%$. В большинстве стран мира ограничения по выбросам NO_x на таком же уровне. Но в некоторых странах проблема с озоном требует NO_x ниже 10 ppm (например, Италия [3]). Этот лимит в Калифорнии достигает менее 2,5 ppm.

В области разработок камер сгорания газотурбинных установок (ГТУ) и горелочных устройств к ним методы и технологии по уровню снижения эмиссий NO_x можно условно классифицировать как:

- низкоэмиссионные – $\text{NO}_x \leq 50 \text{ ppm}$;
- малоэмиссионные – $\text{NO}_x \leq 25 \text{ ppm}$;
- ультра малоэмиссионные (сверхнизкие) – $\text{NO}_x \leq 10 \text{ ppm}$.

Согласно [1] уровень CO в газоперекачивающих агрегатах (ГПА) с газовыми турбинами ограничен до 150 ppm при $\text{O}_2=15\%$. Но по требованиям Европейского союза в новых газовых турбинах CO не должно превышать 50 ppm при $\text{O}_2=15\%$. Сегодня Казахстан активно пересматривает свою политику в области охраны окружающей среды. Готовятся к изданию сборники наилучших доступных технологий (НДТ) с обязательным учетом европейского и российского опыта [4].

С каждым годом экологические требования к топливосжигающим устройствам ужесточаются, а многие существующие технологии не обеспечивают эти требования. Поэтому разработка топливо сжигающих устройств с низким уровнем вредных выбросов и с высокой эффективностью сжигания топлива является актуальным вопросом и вызывает большой исследовательский интерес. В рамках данной статьи рассматриваются основные механизмы образования оксидов азота и влияние температуры пламени в камере сгорания на эмиссию NOx. Влияние других параметров потока в камере сгорания на выход оксидов азота будут рассмотрены во второй части данной статьи, выход которой в печать запланирован в следующем номере.

Материалы и методы

В процессах горения существует три источника NOx: термический, быстрый и с топливным азотом. Быстрый NOx – это NOx, который остается после удаления термического и топливного NOx. При сжигании хорошо перемешанных бедных (по отношению к топливу) смесей быстрый NOx обычно составляет <5 ppm. Быстрый NOx важен, поскольку он является причиной остаточного NOx, который не позволяет достичь нулевого уровня NOx. Однако снижение термических NOx почти до нуля является предпосылкой для достижения сверхнизких выбросов NOx ≤ 10 ppm.

Термический NOx образуется в пламени за счет реагирования азота, который содержится в воздухе с кислородом. Его кинетика описывается механизмом Зельдовича:



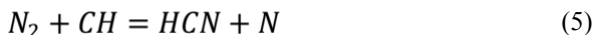
Первые две реакции были впервые определены Зельдовичем [5], а третья реакция была добавлена [6] для учета образования термической NOx в смесях с низкими уровнями атомарного кислорода. В условиях камеры сгорания с малым временем пребывания продуктов горения первая реакция является ограничивающей, поскольку вторая реакция зависит от N, образующегося в первой реакции, при этом не происходит значительной диссоциации газообразного азота при температурах пламени углеводород/воздух. Таким образом, производство NOx ограничено образованием атомарного кислорода путем диссоциации при высоких температурах пламени и константой скорости (1). Следовательно, при сжигании обедненной предварительно

перемешанной топливо-воздушной смеси в газовых турбинах образование термических NOx можно надежно предсказать с помощью (4):

$$\frac{dc_{NO}}{dt} = kc_Oc_{N_2} \quad (4)$$

где k – константа прямой скорости, обычно $7,6 \cdot 10^{13} \exp(-38\,000/T)$ см³/ (моль·с).

Быстрые NOx были впервые измерены Фенимором [7] путем прохождения во внутрь пламени и, показав, что вблизи горелки NOx не равняется нулю. Термические NOx должны линейно увеличиваться с осевым расстоянием в пламени из-за увеличения времени пребывания. Экспериментальные данные о пламени показывают, что термическому механизму NOx предшествовала зона быстрого образования NOx, расположенная в области начального развития пламени. Фенимор назвал этот NOx «быстрым/мгновенным» механизмом и дал первое кинетическое объяснение его происхождения, которое включало реакцию между углеводородом, генерируемым CH и N₂, как в уравнении (5):



N продолжает образовывать NOx в соответствии с уравнением (2) термического механизма, а HCN окисляется в обедненных условиях до NO посредством последовательности реакций с участием HCN→CN→NCO→NO [8]. Эта форма мгновенных NOx чувствительна к уровню углеводородов во фронте пламени, который связан с толщиной зоны реакции. Толщина зоны реакции зависит от конструкции стабилизатора пламени, и это является причиной того, что NOx при сжигании предварительно перемешанных смесей сильно зависит от конструкции стабилизатора пламени.

Николь Д. Г. и др. [9] показали, что еще один способ вызвать NO – это N₂O, образующийся в результате реакции N₂ и O, который затем продолжал формировать NO в результате реакции N₂O и O. Наконец, Боцелли Дж. В. и др. [10] показали, что реакция между N₂ и H с образованием NNH также является важным путем к образованию быстрого NO. Все эти кинетические пути образования NOx в дополнение к термическому обычно называют полными кинетическими прогнозами NOx, а полные механизмы NOx включены в схему кинетики NOx GRI и в модели кинетики пламени Chemkin (Chemical Kinetics).

Топливный NOx возникает, когда топливо содержит органические соединения азота и при горении органический азот окисляется до NO. Большое количество топливного азота обычно содержится в угле и жидких топливах, которые в основном сжигаются в котлах и печах. Поэтому в этих устройствах невозможно достичь уровня сокращения NOx такого как в газовых турбинах. Однако решение проблемы с топливным азотом состоит в том, чтобы сначала сжечь топливо в богатой зоне, где органические соединения азота восстанавливаются до N₂, а затем добавить воздух для получения хорошо перемешанной бедной зоны. Этот метод также снижает термический NOx, но не до низких уровней NOx. Сжигание обогащенной/обедненной смеси также является методом проектирования горелок, который используется для снижения выбросов NOx при почти стехиометрической работе в технологических горелках и котлах.

Природный газ является основным топливом, используемым в промышленных газовых турбинах, и он не имеет топливного азота в составе. Мазут или дизельное топливо имеют низкие уровни топливного азота, обычно порядка 100 ppm, и при этом уровне его оксиды азота будут составлять около 5 ppm при содержании 15 % кислорода в продуктах сгорания. Очевидно, что если топливный азот приближается к 500 ppm в топливе, то в хорошо перемешанных обедненных камерах сгорания весь он преобразуется в NO. Нормативы выбросов NOx в 25 ppm будут обеспечены только за счет топливного азота, и в этом случае невозможно будет ограничить термические или мгновенные выбросы NOx при соблюдении предела NOx в 25 ppm. Так как это нереально, эффективный максимальный уровень азота в топливе составляет около 400 ppm, поскольку это позволило бы просто удовлетворить пределу в 25 ppm, если бы термические и мгновенные NOx не превышали 5 ppm. Обычно в жидком топливе топливный азот содержится от 50 до 200 миллионов частей, что дает около 2-10 ppm NOx при 15 % O₂. Это является одной из причин, почему при сжигании жидкого топлива трудно достичь сверхнизких уровней NOx.

Результаты и обсуждение

Зависимость NOx от температуры пламени. На рисунке 1 показаны результаты расчетов термических NOx по уравнению (1), выполненных Солом и Альтемарком [11] при сжигании природного газа под давлением 20 бар с диапазоном температур воздуха на входе в камеру горения 500, 750 и 1000 К. Рис.1 показывает, что пиковое образование NOx происходит при коэффициенте эквивалентности $\phi \sim 0,85-0,9$, при котором работает большинство газовых печей и котлов. Это делает хорошо перемешанное сжигание наихудшим условием для генерации NOx для горелок котлов. На рисунке 2 показаны прогнозы равновесных NOx с адиабатической

температурой пламени, выполненные Рокке Н. А. и др. [12]. Имеется существенная разница в коэффициенте эквивалентности для пиковой температуры при $\phi \sim 1,05$ и пикового равновесного NO_x при $\phi \sim 0,85$, как и для пиков термических NO_x на рис.1. Для образования термических NO_x требуются высокие температуры пламени, но также требуется кислород, поэтому пиковое образование NO_x не происходит в тех же условиях, что и пиковая температура пламени.

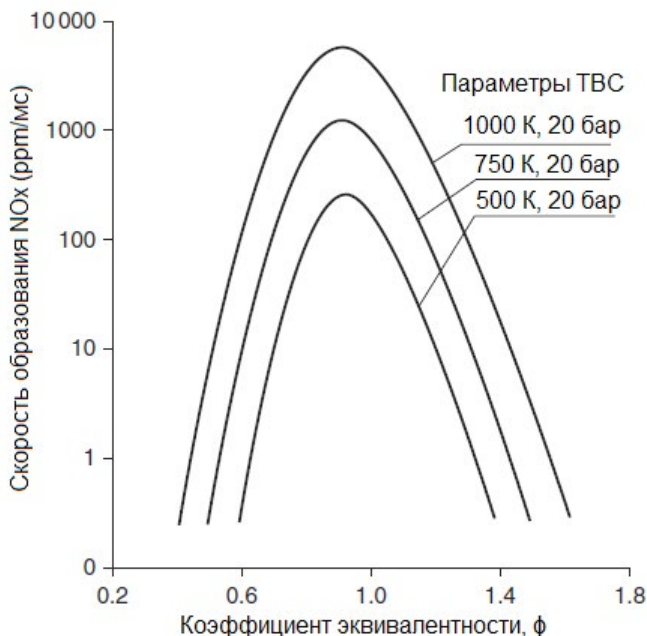


Рисунок 1 – Прогнозы термических NO_x для скорости образования NO_x при 20 бар и входной температуры 500, 750 и 1000 К [11]

На рис.2 показано, что при температуре воздуха 673 К и температуре пламени 1922 К ($\phi=0,6$) прогнозируемое равновесное значение NO_x составило 4300 ppm. Уэйд В.Р. и др. [13] показали, что только для термических NO_x потребуется > 1000 мс для достижения равновесного NO для 1922 К при температуре воздуха на входе 811 К, давлении 3 бар и коэффициенте $\phi=0,5$. Газотурбинные камеры сгорания имеют гораздо меньшее время пребывания, чем данный случай. Камера сгорания с длиной 1 м, эталонной скоростью 25 м/с при 700 К имеет время пребывания 15 мс при 1800 К, и, как правило, камеры сгорания короче этого и время пребывания не превышает 10 мс.

Прогнозы на рис.1 при 1922 К и температуре воздуха 750 К ($\phi=0,53$) дают скорость образования термических NOx 0,6 ppm/мс, а для времени пребывания 5 мс это дает 3 ppm термических NOx. Авторы [13] предсказали, что при 1922 К (температура воздуха на входе 811 К и 3 бар) термические NOx будут генерировать 4 ppm NOx через 5 мс. Все эти прогнозы показывают, что общее образование NOx < 10 ppm должно быть закончено до 1950 К при типичном времени пребывания 5 мс для камер сгорания промышленных газовых турбин. Прогнозы показывают, что термический NOx будет < 5 ppm при 1950 К. Однако выбросы NOx будут чувствительны к времени пребывания за счет термического механизма NOx.

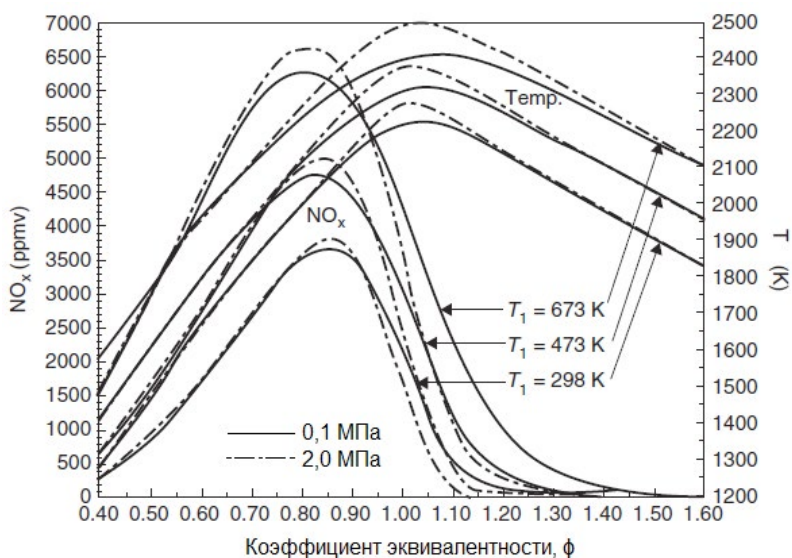


Рисунок 2 – Прогнозы равновесного NOx и адиабатической температуры в зависимости от ϕ для 1 и 20 бар при 298, 473 и 673 К [3]

Термические оксиды азота имеют экспоненциальную зависимость от температуры, это заметно по константе прямой реакции (1). На рис.3 показано моделирование полной кинетики NOx при 10 бар, 600 К и времени пребывания 10 мс [14]. Из графика видно, что при температуре ниже 1950 К NOx прогнозируется < 10 ppm, и большая часть NOx будет образоваться по механизму Фенимора. При более высоких температурах NOx резко увеличивается из-за термического механизма. По рис. 3 можно предположить, что зависимость быстрых оксидов азота от температуры почти линейна. Эти

выводы подтверждаются также результатами экспериментального измерения на рис. 4, где авторы [15] исследовали горение смеси природного газа и водорода в горелке с осевым завихрителем. Водород добавляли для обеспечения устойчивого горения при низких температурах пламени (1200 К), тогда как природный газ имеет стабильное горение 1700 К при атмосферном давлении и 1780 при высоких давлениях. Эти результаты показывают, что NO_x ниже 1 ppm встречается в области 1200–1600 К.

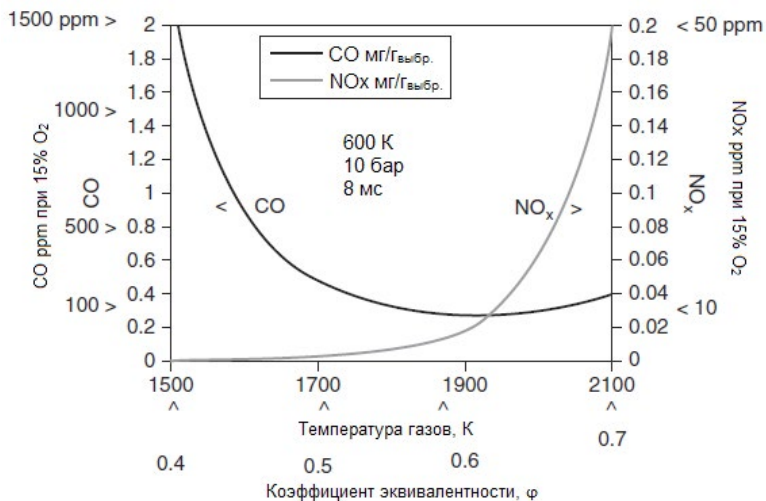


Рисунок 3 – Прогнозы Chemkin с кинетикой GRI выбросов CO и NO_x для температуры на входе 600 К при давлении 10 бар и времени пребывания 8 мс [3]

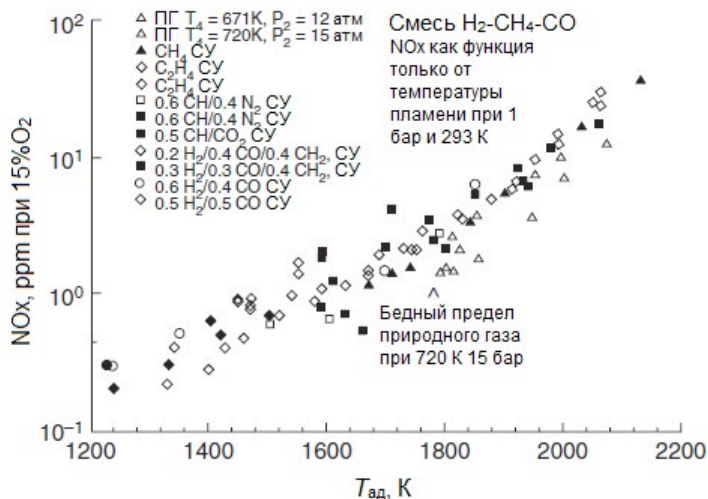


Рисунок 4 – Осевой завихритель с центральным впрыском воздуха (LSI), работающий на природном газе и природном газе с добавлением водорода [3]

Выводы

В процессах горения топлива токсичный NO_x образуется в основном по термическому и быстрому механизму, которых называют механизм Зельдовича и механизм Фенимора, соответственно. При этом в условиях сжигания топлива значительный вклад в общий уровень эмиссий NO_x несет термический NO_x .

Эмиссия NO_x от температуры имеет экспоненциальную зависимость при температуре пламени $>1900\text{ K}$ в основном из-за термического механизма образования NO_x . Ниже этой температуры зависимость является линейной по причине образования в данных условиях мгновенных NO_x , уровень, которых при данной температуре не превышают 10 ppm .

Влияние других параметров потока, таких как давление, время пребывания газов в камере сгорания, степень смешивания топлива и воздуха анализируется во второй части данной работы, которая запланирована к изданию в следующем номере Вестника ТоУ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 ГОСТ 28775-90. Агрегаты газоперекачивающие с газотурбинным приводом. Общие технические условия. – М. : Стандартинофрм, 2005. (с дополнениями по состоянию на 06.04.2015 г.)

2 Директива Европейского Парламента и Совета Европейского Союза №2008/50/ЕС от 21 мая 2008 г. о качестве атмосферного воздуха и мерах его очистки в Европе.

3 **Andrews, G. E.** Ultra-low nitrogen oxides (NO_x) emissions combustion in gas turbine systems. Editor(s): Peter Jansohn, In Wood head Publishing Series in Energy, Modern Gas Turbine Systems, Wood head Publishing, 2013. – P. 715–790.

4 **Ким, В. М.** О гармонизации промышленного развития и улучшении экологической обстановки через НДТ в Казахстане // Вестник ЕНУ имени Л. Н. Гумилева. Серия: Технические науки и технологии. – 2020. – № 4(133). – С. 129–135.

5 **Zeldovich, Ya. B.** The oxidation of nitrogen in combustion explosions. ACTA Physiochimica, XXI. – No. 6 (1946).

6 **Lavoie, G. A., Heywood, J. B., Keck, J. C.** Experimental and theoretical study of nitric oxide formation in internal combustion engines // Combustion science and technology. – 1970. – №1. – P. 313–326.

7 **Fenimore, C. P.** Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames // Thirteenth Symposium (Int.) on Combustion, The Combustion Institute. – 1971. – P. 373–380.

8 **Lefebvre, A. H.** The role of fuel preparation in low emissions combustion // ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 1995. – №117. – P. 617–654. – ASME Paper 95-GT-465

9 **Nicol, D. G., Malte, P. C., Lai, J., Marinov, N. N., Pratt, D. T.** NO_x sensitivities for gas turbine engines operated on lean premixed combustion and conventional diffusion flames // Proceedings of the ASME 1992 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition. – Cologne, Germany. June 1–4, 1992. – №V003T06A012. ASME Paper 92-GT-115.

10 **Bozzelli, J. W., Antony, M.** O+NNH: Possible new route for NO_x formation in flames // International Journal of Chemical Kinetics. – 1995. – № 27(11). – P. 1097–1109.

11 **Saul and Altemark, D.** Lean-burn premixed combustion in gas turbine combustors // Gas Warne International. – 1991. – № 40. – 336 p.

12 **Rokke, N. A., Hustad, J. E., Berg, S.** Pollutant emissions from gas fired turbine engines in offshore practical: measurements and scaling // Proceedings of the ASME 1993 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition. – Cincinnati, Ohio, USA. May 24–27, 1993. – V03AT15A021. ASME Paper 93-GT-170.

13 **Wade, W. R., Shen, P. I., Owen, C. W., Mclean, A. F.** Low emission combustion for the regenerative gas turbine Pt.1 – theoretical and design considerations // Journal of Engineering for Power. – 1974. – №1(96). – P. 32–48. – ASME Paper 73-GT-11.

14 **Rokke, P. E., Hustad, J. E., Rokke, N. A., Svendsgaard, O. B.** Technology update on gas turbine dual fuel, dry low emissions combustion systems // Proceedings of the ASME Turbo Expo 2003, collocated with the 2003 International Joint Power Generation Conference. – Atlanta, Georgia, USA. June 16–19, 2003. – Vol. 2. – P. 97-107. ASME Paper GT2003–38112.

15 **Littlejohn, D., Cheng, R. K., Noble, D. R., Lieuwen, T.** Laboratory investigations of low-swirl injectors operating with syngas // Proceedings of the ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea, and Air. – Berlin, Germany. June 9–13, 2008. – Vol. 3. – P. 1001-1010. – ASME Paper GT2008–51298.

REFERENCES

1 GOST 28775-90. Agregaty gazoperekachivayushchiye s gazoturbinnym privodom. Obshchiye tekhnicheskiye usloviya. [Gas compressor units with gas turbine drive. General specifications.] – Moscow : Standartinofrm, 2005. (s dopolneniyami po sostoyaniyu na 06.04.2015 g.)

2 Direktiva Yevropeyskogo Parlamenta i Soveta Yevropeyskogo Soyuzu №2008/50/YES ot 21 maya 2008 g. o kachestve atmosfernogo vozdukh i merakh yego ochistki v Yevrope. [Directive of the European Parliament and of the Council of the European Union No. 2008/50/EC of May 21, 2008 on air quality and measures for its purification in Europe.]

3 **Andrews, G. E.** Ultra-low nitrogen oxides (NOx) emissions combustion in gas turbine systems. Editor(s): Peter Jansohn, In Wood head Publishing Series in Energy, Modern Gas Turbine Systems, Wood head Publishing, – 2013. – P. 715–790.

4 **Kim, V. M.** O garmonizatsii promyshlennogo razvitiya i uluchshenii ekologicheskoy obstanovki cherez NDT v Kazakhstane [On the harmonization of industrial development and improvement of the environmental situation through BAT in Kazakhstan] // Vestnik YENU im. L.N.Gumileva. Seriya: Tekhnicheskiye nauki i tekhnologii. – 2020. – № 4(133). – P. 129–135.

5 **Zeldovich, Ya. B.** The oxidation of nitrogen in combustion explosions. ACTA Physiochimica, XXI. – No. 6 (1946).

6 **Lavoie, G. A., Heywood, J. B., Keck, J. C.** Experimental and theoretical study of nitric oxide formation in internal combustion engines // Combustion science and technology. – 1970. – № 1. – P. 313–326.

7 **Fenimore, C. P.** Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames // Thirteenth Symposium (Int.) on Combustion, The Combustion Institute. – 1971. – P. 373–380.

8 **Lefebvre, A. H.** The role of fuel preparation in low emissions combustion // ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 1995. – № 117. – P. 617-654. – ASME Paper 95-GT-465

9 **Nicol, D. G., Malte, P. C., Lai, J., Marinov, N. N., Pratt, D. T.** NOx sensitivities for gas turbine engines operated on lean premixed combustion and conventional diffusion flames // Proceedings of the ASME 1992 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition. – Cologne, Germany. June 1–4, 1992. – №V003T06A012. ASME Paper 92-GT-115.

10 **Bozzelli, J. W., Antony, M.** O+NNH: Possible new route for NOx formation in flames // International Journal of Chemical Kinetics. – 1995. – № 27(11). – P. 1097–1109.

11 **Saul and Altemark, D.** Lean-burn premixed combustion in gas turbine combustors // Gas Warne International. – 1991. – № 40. – 336 p.

12 **Rokke, N. A., Hustad, J. E., Berg, S.** Pollutant emissions from gas fired turbine engines in offshore practical: measurements and scaling // Proceedings of the ASME 1993 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition. – Cincinnati, Ohio, USA. May 24–27, 1993. – V03AT15A021. ASME Paper 93-GT-170.

13 **Wade, W. R., Shen, P. I., Owen, C. W., Mclean, A. F.** Low emission combustion for the regenerative gas turbine Pt.1 – theoretical and design considerations // Journal of Engineering for Power. – 1974. – № 1(96). – P. 32–48. – ASME Paper 73-GT-11.

14 **Rokke, P. E., Hustad, J. E., Rokke, N. A., Svendsgaard, O. B.** Technology update on gas turbine dual fuel, dry low emissions combustion systems // Proceedings of the ASME Turbo Expo 2003, collocated with the 2003 International Joint Power Generation Conference. – Atlanta, Georgia, USA. June 16–19, 2003. – Vol. 2. – P. 97–107. – ASME Paper GT2003–38112.

15 **Littlejohn, D., Cheng, R. K., Noble, D. R., Lieuwen, T.** Laboratory investigations of low-swirl injectors operating with syngas // Proceedings of the ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea, and Air. – Berlin, Germany. June 9–13, 2008. – Vol. 3. – P. 1001–1010. – ASME Paper GT2008–51298.

Материал поступил в редакцию 28.02.22.

*А. М. Достияров¹, С. Б. Садыкова², *Н. Р. Картджанов³*

¹Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті,

Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

^{2,3}Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,

Қазақстан Республикасы, Нұр-Сұлтан қ.

Материал 28.02.22 баспаға түсті.

ГАЗТУРБИНАЛАРЫНЫҢ ЖАҢУ КАМЕРАСЫНДАҒЫ АҒЫН ПАРАМЕТРЛЕРІНІҢ NO_x ЭМИССИЯСЫНА ӘСЕРІ

Мақалада жану камерасындағы ағын параметрлерінің NO_x эмиссиясына әсері анализденеді. Азот оксидінің түзілу механизмдерінің сипаттамасы келтіріледі, сондай-ақ термиялық және жылдам NO_x деңгейіне жану камерасындағы жалын температурасының әсері зерттеледі. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, термиялық NO_x түзілуін толығымен жою NO_x-тің нөлдік деңгейін қамтамасыз етпейді, бұл жағдайда қалдық NO_x жылдам NO_x болып табылады. Сондай-ақ, термиялық азот оксидтерінің температураға тәуелділігі экспоненциалды, ал жылдам азот оксидтерінің түзілуі жалынның температурасы 1950 К-нен төмен кезде сызықтық тәуелділікке ие екендігі көрсетілген. Мақала жылу энергетика саласындағы зерттеушілер мен мамандардың қызығушылығын тудырады.

Кілтті сөздер: азот оксиді, жану камерасы, жылдам NO_x, термиялық NO_x, газ турбинасы.

*A. M. Dostiyarov¹, S. B. Sadykova², *N. R. Kartjanov³*

¹Gumarbek Daukeev Almaty University of Energy and Communications, Republic of Kazakhstan, Almaty;

^{2,3}L. N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan, Nur-Sultan.

Material received on 28.02.22.

EFFECT OF FLOW PARAMETERS IN GAS TURBINE COMBUSTION CHAMBER ON NO_x EMISSION

The article analyzes the influence of flow parameters in the combustion chamber on NO_x emission. The mechanisms description of formation of nitrogen oxides is given, as well as the effect on the level of thermal and prompt NO_x of flame temperature in the combustion chamber is investigated. The study results show that the complete elimination of thermal NO_x formation does not provide a zero level of NO_x, in this case the residual NO_x is prompt NO_x. It is also shown that the dependence of thermal nitrogen oxides on temperature is exponential, and the formation of prompt nitrogen oxides on temperature has a linear dependence at a flame temperature of less than 1950 K. The article may be of interest to researchers and specialists in the field of thermal power engineering.

Keywords: nitrogen oxides, combustion chamber, instantaneous NO_x, thermal NO_x, gas turbine.

Теруге 28.02.2022 ж. жіберілді. Басуға 18.03.2022 ж. қол қойылды.

Электрондық баспа

3,77 Мб RAM

Шартты баспа табағы 13,12. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: З. С. Исакова

Корректор: А. Р. Омарова

Тапсырыс № 3883

Сдано в набор 28.02.2022 г. Подписано в печать 18.03.2022 г.

Электронное издание

3,77 Мб RAM

Усл. печ. л. 13,12. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: З. С. Исакова

Корректор: А. Р. Омарова

Заказ № 3883

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

«Торайғыров университет»

коммерциялық емес акционерлік қоғамы

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

«Торайғыров университет»

коммерциялық емес акционерлік қоғамы

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

8 (7182) 67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz