

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

---

№ 2 (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/ZOCF4313>

---

**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 университете

<https://doi.org/10.48081/CPYH8655>**\*А. М. Достияров<sup>1</sup>, С. М. Б Садыкова<sup>2</sup>, Н. Р. Картджанов<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, Республика Казахстан, г. Алматы;

<sup>2,3</sup>Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, Республика Казахстан, г. Нур-Султан

## **ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ГАЗОВЫХ ТУРБИН НА ЭМИССИЮ NO<sub>x</sub>. ЧАСТЬ 2**

*В статье проанализировано влияние параметров потока в камере сгорания на эмиссию NO<sub>x</sub>. Исследуется влияние на уровень термических и мгновенных NO<sub>x</sub> давления, времени пребывания газов в камере сгорания и степени смешивания топлива и воздуха. Результаты исследования показывают, что эмиссия мгновенных NO<sub>x</sub> не зависит от давления в камере сгорания. Рост температуры пламени увеличивает образование не только термических NO<sub>x</sub>, но и мгновенных NO<sub>x</sub>. В качестве параметра смешивания топлива и воздуха выбрано отношение флуктуаций среднего коэффициента эквивалентности к среднему коэффициенту эквивалентности. Показано, что сжигание предварительно перемешанных смесей при температуре пламени < 1950К и с малым временем пребывания в зоне горения обеспечат сведение до минимума объёмов термических NO<sub>x</sub> и достижение сверхнизких уровней эмиссии NO<sub>x</sub> в целом. На основе полученных зависимостей сформулированы требования к созданию новых горелочных устройств для камер сгорания газовых турбин с уровнем выбросов оксидов азота меньше 20 ppт при 15 % O<sub>2</sub>. Статья может быть интересна исследователям и специалистам в области теплоэнергетики.*

*Ключевые слова:* оксиды азота, камера сгорания, мгновенные NO<sub>x</sub>, термические NO<sub>x</sub>, газовая турбина.

## **Введение**

Данная работа является логическим продолжением исследования по влиянию различных параметров потока в камере сгорания на эмиссию NOx [1]. В первой части исследования были проанализированы механизмы образования оксидов азота. А также в качестве параметра потока было исследовано влияние температуры пламени на термические и мгновенные NOx. В рамках данной статьи рассматривается влияние давления, времени пребывания газов в камере сгорания и степени смешивания топлива и воздуха на эмиссию NOx. А также на основе этого анализа выводятся требования и рекомендации к конструкциям горелочных устройств, обеспечивающих низкие уровни NOx.

## **Материалы и методы**

Методы, а также основные уравнения и закономерности исследования подробно были описаны в первой части данного исследования [1].

## **Результаты и обсуждение**

Зависимость NOx от давления. Концентрация [O] в уравнении пропорциональна [O<sub>2</sub>]<sup>0,5</sup>, и это приводит к зависимости образования NOx от давления при той же температуре пламени под квадратным корнем. Для традиционных камер сгорания газовых турбин с диффузионным пламенем имеется достаточно доказательств того, что термические NOx изменяются от квадратного корня давления [2], и это соотношение давления заложено в правилах CAEP по NOx для газовых турбин.

Ключевой особенностью газовых турбин со сверхнизким уровнем выбросов NOx, в которых исключено образование термических NOx за счет работы на обедненной и хорошо перемешанной смеси, является отсутствие зависимости выбросов NOx от давления. Это показано на примере цилиндрической топливной форсунки TE [3] и экспериментальные результаты для этой горелки по влиянию давления продемонстрированы на рис. 1. Из рис. 1 видно, что при  $\phi < 0,51$  отсутствует влияние давления на NOx, и это условие соответствует температуре пламени 1820 К при температуре воздуха на входе 700 К. В этом устройстве была проделана значительная работа по улучшению смешивания топлива и воздуха, и эта относительно низкая критическая температура для возникновения термических NOx была связана с неадекватным качеством смешивания основного топлива и воздуха.

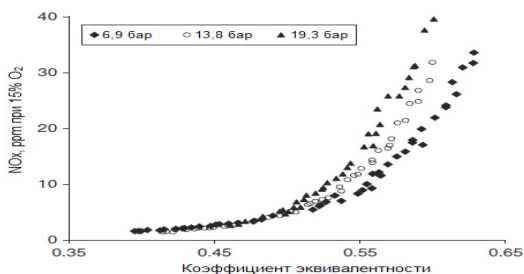


Рисунок 1 – Влияние давления на NOx как функция от  $\phi$  [3]

Критическая температура пламени, при которой выбросы NOx не имеют значительных термических NOx, также является температурой, при которой отсутствует измеримое влияние давления, и это зависит от качества смешивания топлива и воздуха. Альтермарк и Кнаубер [4] обнаружили, что при сжигании предварительно перемешанной смеси NOx не зависит от давления для  $\phi < 0,6$ , и что критической температурой для возникновения термических NOx является 1920 К при температуре на входе 600 К. Леонард и Корреа [5] при сжигании предварительно перемешанных смесей в горелке с перфорированной пластиной не обнаружили влияния давления (3–10 бар) на NOx вплоть до  $\phi = 0,7$  при 600 К, что соответствует температуре пламени 2050 К, где NOx составлял 4 ppm. Леонард и Стагмайер [6] не обнаружили влияния давления на NOx при горении предварительно перемешанных смесей в исследованном диапазоне температур пламени 1700–1920 К, где NOx составлял 2–8 ppm. Другие исследователи также не обнаружили эффекта давления ниже 1900 К [7] и 2000 К [8], когда NOx составлял  $< 10$  ppm вплоть до 2000 К. Приведенные выше работы по влиянию давления указывают на то, что критическая температура возникновения термических NOx находится в районе 1900 К, но может достигать 2000 К при очень хорошо перемешанном горении. Разумной максимальной критической температурой может быть 1950 К, и это подтверждается прогнозами кинетики термического NOx.

Герберлинг П.В. [9] показал, что выбросы мгновенных NOx не зависят от давления в диапазоне 1–18 бар. Существуют теоретические и экспериментальные доказательства того, что кинетический путь N<sub>2</sub>O для быстрых NOx имеет зависимость от отрицательного давления [3, 10, 11] в области, где NO  $< 3$  ppm. Эти результаты показывают, что если устранить термические NOx за счет сжигания предварительно перемешанных смесей при температуре пламени ниже 1950 К, то предположить, что никакого значительного увеличения NOx с давлением не произойдет. Более того,

уменьшение NO<sub>x</sub> с давлением наиболее вероятно в области сверхнизких NO<sub>x</sub>, где наблюдается <3 ppm.

Отсутствие влияния давления на выбросы NO<sub>x</sub> после устранения термических NO<sub>x</sub> позволяет разрабатывать камеры сгорания со сверхнизкими уровнями NO<sub>x</sub> при атмосферном давлении, где можно развивать улучшение предварительного перемешивания топлива и воздуха. Только после достижения <10 ppm при атмосферном давлении может потребоваться полное испытание двигателя под давлением.

Влияние времени пребывания газов на эмиссию NO<sub>x</sub>. На рисунке 2 показаны полные кинетические расчеты GRI Сайед и Бьюкенен [12] для условий реактора с мешалкой при времени пребывания 1 и 5 мс. При 1900 К и времени пребывания 1 мс термический NO<sub>x</sub> составлял 1 ppm, но общий NO<sub>x</sub> составлял 2,2 ppm, что увеличилось только до 2,7 ppm при времени пребывания 5 мс. При 1800 К и времени пребывания 1 мс термические NO<sub>x</sub> были незначительными, а общий NO<sub>x</sub> составлял 1,2 ppm, увеличиваясь до 1,5 ppm за 5 мс. При 1950 К и времени пребывания 5 мс полная кинетика общего NO<sub>x</sub> была предсказана на уровне 3, 2 ppm, подтверждая, что низкий уровень NO<sub>x</sub> должен быть достигнут до 1950 К.

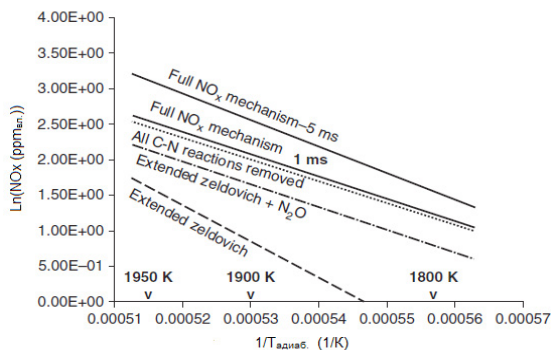


Рисунок 2 – GRI 3.0 Прогнозирование механизма NO<sub>x</sub> для NO<sub>x</sub> по различным кинетическим маршрутам с использованием вычислений PSR. Прогнозы для времени пребывания в реакторе 1 и 5 мс при давлении 14 бар и температуре на входе 673 К [12]

Аналогичные выводы относительно важности мгновенных выбросов NO<sub>x</sub> в условиях, когда термические NO<sub>x</sub> были небольшими, были сделаны Корреа и др. [13] с помощью анализа в реакторе с мешалкой. Они обнаружили, что при 1521 К и времени пребывания 2,9 мс общее количество NO<sub>x</sub> составляло 5, причем 4,1 ppm из них приходились на мгновенный

механизм углеводородов, 0,75 ppm на мгновенный механизм  $N_2O$  и 0,15 ppm на термический механизм  $NO_x$ . Аналогичные расчеты были выполнены для практических камер сгорания газовых турбин при сжигании синтетического газа [14], где при 1800 К термические  $NO_x$  были рассчитаны на уровне 1 ppm, а мгновенные  $NO_x$  на уровне 4,5 ppm, что дает общее количество  $NO_x$  5,5 ppm. При 1900 К термические и мгновенные  $NO_x$  составляли по 7 миллионов частей, что дает общее количество  $NO_x$  14 ppm.

Ведешкин и др. [15] вычислили вклад термических  $NO_x$  в общие  $NO_x$  в размере 5 и 10 ppm, как показано на рис.3. При времени пребывания 5 мс для образования 5 ppm  $NO_x$  только из термического механизма требовалась температура пламени 1960 К, и 1910 К, если также был включен механизм быстрого  $NO_x$ . Если время пребывания составляло 10 мс, то две температуры для 5 ppm  $NO_x$  были 1990 и 1970 К для общей кинетики  $NO_x$  и только для термических  $NO_x$  соответственно. На рис.3 показано, что при 1800 К для образования 5 ppm  $NO_x$  из термического механизма требуется время пребывания 200 мс и 100 мс – из термических и быстрых механизмов. При 2000 К 5 ppm  $NO_x$  будут генерироваться за 2 мс с помощью термического механизма и за 0,8 мс с помощью термических и быстрых механизмов. Все эти расчеты показывают, что  $NO_x < 10$  ppm может быть достигнуто для температур пламени  $< 1950$  К, включая термический и быстрый кинетический пути образования  $NO$ , при условии, что время пребывания газов не слишком велико.

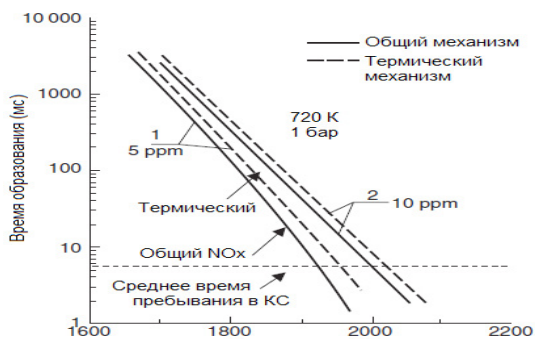


Рисунок 3 – Влияние времени пребывания на производство  $NO_x$  для термической и общей кинетики образования  $NO_x$ [19]

Параметр смешивания  $S$  и его влияние на  $NO_x$ . Влияние несовершенства смешивания на скорость образования термических  $NO_x$  в атмосферных условиях показано на рис.4 для применения в технологических горелках. Влияние перемешивания топлива и воздуха показано путем наложения

синусоидального колебания  $\phi$  вокруг среднего  $\phi$ , а затем с использованием термической кинетики  $\text{NO}_x$  для прогнозирования выбросов  $\text{NO}_x$ . Параметр смешивания  $S$  – это отношение амплитуды колебаний  $\phi$  к среднему  $\phi_{\text{ср}}$ . Предварительно перемешанные топливо-воздушные смеси соответствует  $S=0$ , и влияние несовершенства смешивания или повышенного  $S$  заключается в уменьшении образования  $\text{NO}_x$  в почти стехиометрической области. Это связано с тем, что колебания на стороне обогащения и обеднения являются более низкими  $\text{NO}_x$ , чем стехиометрическими, поэтому чем хуже смешивание, тем ниже  $\text{NO}_x$ . Это важно при проектировании технологических горелок, где идеальное смешивание не является выбором конструкции для достижения низких уровней  $\text{NO}_x$ .



Рисунок 4 – Скорость образования  $\text{NO}_x$  как функция коэффициента эквивалентности с влиянием параметра смешивания  $S$  при 0,1, 0,2 и 0,5 [16, 17]

В области коэффициента эквивалентности, относящейся к камерам сгорания ГТУ, беднее, чем при  $\phi=0,6$ , рис.4 показывает, что несовершенства смешивания увеличивают  $\text{NO}_x$ . Это связано с тем, что колебания, превышающие среднее значение, имеют гораздо более высокие локальные температуры и скорость образования  $\text{NO}_x$ . На рис.4 показано, что для  $\phi=0,5$   $S$  должно быть  $<0,1$ , чтобы увеличение  $\text{NO}_x$  по сравнению с горением предварительно перемешанных смесей не превышало более  $\times 3$ . На рис.5 показаны результаты аналогичных расчетов при условиях камеры сгорания газовой турбины 30 бар, температуре воздуха 800 К и времени пребывания 5 мс. На рисунке приведен индекс выбросов  $\text{NO}_x$  (EI,  $\text{гNO}_x/\text{кг топлива}$ ), который  $\text{EI}=1 \text{ гNO}_x/\text{кгтоп}$  примерно равен 10 ppm  $\text{NO}_x$  с поправкой на 15 % кислорода. Результаты на рис.5 показывают, что для  $\phi=0,5$  (1900 К) термический  $\text{NO}_x$  при горении предварительно перемешанных смесей будет примерно 1 ppm при 15 %  $\text{O}_2$ , и увеличится до 4 ppm при  $S=0,1$  и 20 ppm при  $S=0,2$ . Ясно, что для того, чтобы смешивание топлива и воздуха



считалось хорошо перемешанным, значение  $S$  в том месте в пламени, где тепловыделение почти завершено, должно быть  $S < 0,1$ .

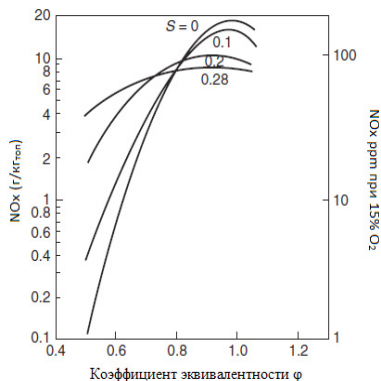


Рисунок 5 – Влияние  $S$  на  $\text{NO}_x$  в зависимости от  $\phi$  при 30 бар, 800 К и времени пребывания 5 мс [19]

Важно отметить, что  $S < 0,1$  не является обязательным требованием на выходе из горелки или канала предварительного смешивания, поскольку там не возникает пламя. Перемешивание продолжается в расширяющемся слое сдвига по мере того, как поток расширяется от минимального проходного сечения и наивысших локальных скоростей в стабилизаторе пламени до средней скорости в камере сгорания. Высокая турбулентность в сдвиговых слоях, например, для радиальных завихрителей, приведенных в [19], возникает до того, как температура станет достаточно высокой, чтобы быть значимой для термического образования  $\text{NO}_x$ .

Смешивание топлива и воздуха завершается в области высокой турбулентности в сдвиговом слое после стабилизатора пламени перед основным тепловыделением пламени. Топливо необходимо впрыскивать в такое положение, которое имеет области высокой турбулентности [18]. Расположение впрыска топлива так же важно, как и аэродинамика стабилизатора пламени для достижения хорошего перемешивания и низких выбросов  $\text{NO}_x$ .

## Выводы

Зависимость эмиссии оксидов азота от основных параметров потока можно обозначить следующими пунктами:

- при сжигании предварительно перемешанных смесей с коэффициентом эквивалентности  $\phi < 0,6$ , что примерно соответствует температуре пламени 1920 К, эмиссия  $\text{NO}_x$  не зависит от давления в камере сгорания. Поэтому

топливо сжигающие устройства для камер сгорания газовых турбин можно исследовать при атмосферном давлении.

- увеличение времени пребывания продуктов горения в зоне пламени сильно увеличивает выход NOx. Это не только связано с термическим механизмом. В условиях пламени с умеренным термическим NOx, с ростом времени пребывания увеличивается также выход мгновенных NOx.

- при сжигании обедненных топливо-воздушных смесей только за счет хорошего перемешивания (S ближе к 0) можно добиться сверхнизких уровней эмиссии NOx. В условиях стехиометрического сжигания улучшение перемешивания ведет к росту NOx, из-за быстрого достижения адиабатической температуры пламени.

Обзор исследований показывает, что предпосылкой к созданию камер сгорания газовых турбин со сверхнизкими уровнями NOx является уменьшение выбросов термических оксидов азота. Для обеспечения существующих и будущих экологических норм по выбросам NOx и для достижения низких уровней эмиссии NOx проектируемые горелочные устройства для камер сгорания должны обеспечивать следующие условия:

- сжигание предварительно перемешанной обедненной топливо-воздушной смеси;
- условия для хорошего перемешивания топливо-воздушной смеси;
- устойчивое горение при температуре ниже 1950 K;
- стабильность пламени в широком диапазоне работы горелки;
- малое время пребывания продуктов горения в зоне высокой температуры.

Существующие камеры сгорания газовых турбин не обеспечивают эмиссию NOx меньше 20 ppm при 15% кислорода в газах. А приведенные в этой работе исследования по достижению выбросов имеют < 10 ppm, многие из которых относятся к лабораторным условиям и обладают узким диапазоном устойчивой работы. Поэтому создание горелочных устройств для камер сгорания газовых турбин с учетом вышеперечисленных пунктов позволит достичь эмиссию оксидов азота меньше 20 ppm.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Достияров, А. М., Садыкова, С. Б., Картджанов, Н. Р.** Влияние параметров потока в камере сгорания газовых турбин на эмиссию NOx. Часть 1 // Вестник ТоУ. Энергетическая серия. - 2022. – № 1

2 **Sawyer, R. F., Cernansky, N. P., Oppenheim, A. K.** Factors controlling pollutant emissions from gas turbine engines, atmospheric pollution by aircraft engines // AGARD CPP-125. – 1973. – №22. – pp. 1-13.

3 **Bhargav, A., Kendrick, D. W., Castleton, K. H., Colket, M. B., Sowa, W. A.** Pressure effect on NO<sub>x</sub> and CO emissions in industrial gas turbines // Proceedings of the ASME Turbo Expo 2000: Power for Land, Sea, and Air. – Munich, Germany. May 8–11, 2000. – V002T02A017. ASME Paper 2000-GT-97.

4 **Altemark, D., Knauber, R.** Ergebnisse von Untersuchungen an einem Vormischbrenner unter Druck mit extrem niedriger NO<sub>x</sub>-emission // VDI Berichte. –1987. – №645. – pp. 299–311.

5 **Leonard, G., Correa, S. M.** NO<sub>x</sub> formation in premixed high-pressure lean methane flames // 2nd ASME Fossil Fuel Combustion Symposium. – 1990, New Orleans, Louisiana. – ASME/PD 30, Singh S.N. Ed. – pp.69–74.

6 **Leonard, G., Stegmaier, J.** Development of an aeroderivative gas turbine dry low emissions combustion system // Proceedings of the ASME 1993 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition. – Cincinnati, Ohio, USA. May 24–27, 1993. – V03BT16A044. ASME Paper 93-GT-288

7 **Marutani, Y., Fujimori, T., Riechelmann, D., Mizutani, T., Mikami, M.** Study on pre-vaporized and premixed gas turbine combustion technology for high carbon ratio fuel (HFRF) // Proceedings of the International Gas Turbine Congress 2003 Tokyo. – P. IGTC2003Tokyo TS-152.

8 **Cheng, R. K., Littlejohn, D., Nazeer, W. A., Smith, K. O.** Laboratory studies of the flow field characteristics of low-swirl injectors for adaptation to fuel-flexible turbines // Proceedings of the ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea, and Air. – Barcelona, Spain. May 8–11, 2006. – Vol.1. – pp. 649-662. ASME Paper GT2006–90878.

9 **Herberling, P. V.** Prompt NO measurements at high pressures // Sixteenth Symposium (Int.) on Combustion, The Combustion Institute. – 1976. – pp. 159–168.

10 **Steele, R. C., Jorett, A., Nicol, D.** Variables affecting NO<sub>x</sub> formation in lean premixed combustion. Proceedings of the ASME 1995 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition. Houston, Texas, USA. June 5–8, 1995. – V003T06A018. ASME Paper 95-GT-107.

11 **Malte, P.C., Rutar, T.** NO<sub>x</sub> formation in high pressure jet stirred reactors with significance to lean-premixed combustion turbines. Proceedings of the ASME Turbo Expo 2001: Power for Land, Sea, and Air. New Orleans, Louisiana, USA. June 4–7, 2001. – V002T02A034. ASME Paper 2001-GT-67.

12 **Syed, K. J., Buchanan, E.** The nature of NO<sub>x</sub> formation within an industrial gas turbine dry low emissions combustor // Proceedings of the ASME Turbo Expo 2005: Power for Land, Sea, and Air. Reno, Nevada, USA. June 6–9, 2005. – Vol.2. –pp. 11-18. ASME Paper GT2005–68070.

13 **Correa, S. M.** Lean-premixed combustion for gas turbines: Review and required research // ASME Fossil Fuel Combustion. – 1991. – PD-Vol. 33, pp. 1–9.

14 **Anandi, A., Haynes, J., May, P., Iyev, V.** Evaluation of emission performance of existing combustion technology for syngas combustion // Proceedings of the ASME Turbo Expo 2005: Power for Land, Sea, and Air. – Reno, Nevada, USA. June 6–9, 2005. – Vol.2. – pp. 353–365. ASME Paper 2005–68513.

15 **Vedeshkin, G., Sverdlov, E., Goltsev, V., Doubovitsky, A., Usenko, D.** Low emission combustor developed for industrial gas turbine with NO<sub>x</sub>/CO level <5ppm // Proceedings of the International Gas Turbine Congress 2007 Tokyo. – IGTC2007 Tokyo TS-132.

16 **Fletcher, R. S., Heywood, J. B.** A model for nitric oxide emissions from aircraft gas turbine engines // AIAA Paper. – 1971. – pp. 71–123.

17 **Appleton, J. P., Heywood, J. B.** The effects of imperfect fuel-air mixing in a burner on NO formation from nitrogen in the air and the fuel // Fourteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute. – 1973, Pittsburgh. – pp. 777–786.

18 **Sadykova, S. B., Dostiyarov, A. M., Zhumagulov, M. G., Kartjanov, N. R.** Influence of turbulence on the efficiency and reliability of combustion chamber of the gas turbine // Thermal Science Journal. – 2021. – № 25 (6 Part A). – C. 4321–4332.

19 **Andrews, G. E.** Ultra-low nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) 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, – pp. 715–790.

## REFERENCES

1 **Dostiyarov, A. M., Sadykova, S. B., Kartjanov, N. R.** Vliyaniye parametrov potoka v kamere sgoraniya gazovykh turbin na emissiyu NO<sub>x</sub>. Chast' 1 [Influence of flow parameters in the combustion chamber of gas turbines on NO<sub>x</sub> emission. Part 1] // Bulletin of Toraigyrov University. Energy series. – 2022. - № 1

2 **Sawyer, R. F., Cernansky, N. P., Oppenheim, A. K.** Factors controlling pollutant emissions from gas turbine engines, atmospheric pollution by aircraft engines // AGARD CPP-125. – 1973. – №22. – pp. 1–13.

3 **Bhargava, A., Kendrick, D. W., Castleton, K. H., Colket, M. B., Sowa, W. A.** Pressure effect on NO<sub>x</sub> and CO emissions in industrial gas turbines // Proceedings of the ASME Turbo Expo 2000: Power for Land, Sea, and Air. – Munich, Germany. May 8–11, 2000. – V002T02A017. ASME Paper 2000-GT-97.

4 **Altemark, D., Knauber, R.** Ergebnisse von Untersuchungen an einem Vormischbrenner unter Druck mit extrem niedriger NO<sub>x</sub> –emission // VDI Berichte. – 1987. – №645. – pp. 299–311.

5 **Leonard, G., Correa, S. M.** NO<sub>x</sub> formation in premixed high-pressure lean methane flames // 2nd ASME Fossil Fuel Combustion Symposium. – 1990, New Orleans, Louisiana. – ASME/PD 30, Singh S.N. Ed. – pp.69–74.

6 **Leonard, G., Stegmaier, J.** Development of an aeroderivative gas turbine dry low emissions combustion system // Proceedings of the ASME 1993 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition. – Cincinnati, Ohio, USA. May 24–27, 1993. – V03BT16A044. ASME Paper 93–GT-288

7 **Marutani, Y., Fujimori, T., Riechelmann, D., Mizutani, T., Mikami, M.** Study on pre-vaporized and premixed gas turbine combustion technology for high carbon ratio fuel (HFRF) // Proceedings of the International Gas Turbine Congress 2003 Tokyo. – P. IGTC2003Tokyo TS-152.

8 **Cheng, R. K., Littlejohn, D., Nazeer, W. A., Smith, K. O.** Laboratory studies of the flow field characteristics of low-swirl injectors for adaptation to fuel-flexible turbines // Proceedings of the ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea, and Air. – Barcelona, Spain. May 8–11, 2006. – Vol.1. – pp. 649-662. ASME Paper GT2006–90878.

9 **Herberling, P. V.** Prompt NO measurements at high pressures // Sixteenth Symposium (Int.) on Combustion, The Combustion Institute. – 1976. – pp. 159–168.

10 **Steele, R. C., Joret, A., Nicol, D.** Variables affecting NO<sub>x</sub> formation in lean premixed combustion. Proceedings of the ASME 1995 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition. Houston, Texas, USA. June 5–8, 1995. – V003T06A018. ASME Paper 95–GT-107.

11 **Malte, P. C., Rutar T.** NO<sub>x</sub> formation in high pressure jet stirred reactors with significance to lean-premixed combustion turbines. Proceedings of the ASME Turbo Expo 2001: Power for Land, Sea, and Air. New Orleans, Louisiana, USA. June 4–7, 2001. – V002T02A034. ASME Paper 2001–GT-67.

12 **Syed, K. J., Buchanan, E.** The nature of NO<sub>x</sub> formation within an industrial gas turbine dry low emissions combustor // Proceedings of the ASME Turbo Expo 2005: Power for Land, Sea, and Air. Reno, Nevada, USA. June 6–9, 2005. – Vol.2. –pp. 11–18. ASME Paper GT2005–68070.

13 **Correa, S. M.** Lean-premixed combustion for gas turbines: Review and required research // ASME Fossil Fuel Combustion. – 1991. – PD-Vol. 33, pp. 1–9.

14 **Anandi, A., Haynes, J., May, P., Iyev, V.** Evaluation of emission performance of existing combustion technology for syngas combustion // Proceedings of the ASME Turbo Expo 2005: Power for Land, Sea, and Air. – Reno, Nevada, USA. June 6–9, 2005. –Vol.2. – pp. 353–365. ASME Paper 2005–68513.

15 **Vedeshkin, G., Sverdlov, E., Goltsev, V., Doubovitsky, A., Usenko, D.** Low emission combustor developed for industrial gas turbine with NO<sub>x</sub>/CO level <5ppm // Proceedings of the International Gas Turbine Congress 2007 Tokyo. – IGTC2007 Tokyo TS–132.

16 **Fletcher, R. S., Heywood, J. B.** A model for nitric oxide emissions from aircraft gas turbine engines // AIAA Paper. – 1971. – pp. 71–123.

17 **Appleton, J. P., Heywood, J. B.** The effects of imperfect fuel-air mixing in a burner on NO formation from nitrogen in the air and the fuel // Fourteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute. – 1973, Pittsburgh. – pp. 777–786.

18 **Sadykova, S. B., Dostiyarov, A. M., Zhumagulov, M. G., Kartjanov, N. R.** Influence of turbulence on the efficiency and reliability of combustion chamber of the gas turbine // Thermal Science Journal. - 2021. – № 25 (6 Part A). – С. 4321–4332.

19 **Andrews, G. E.** Ultra-low nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) 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, – pp. 715–790.

Материал поступил в редакцию 13.06.22.

*А. М. Достияров<sup>1</sup>, С. Б. Садыкова<sup>2</sup>, \*Н. Р. Картджанов<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;

<sup>2,3</sup>Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,

Қазақстан Республикасы, Нұр-Сұлтан қ.

Материал баспаға 13.06.22. түсті.

## **ГАЗТУРБИНАЛАРЫНЫҢ ЖАНУ КАМЕРАСЫНДАҒЫ АҒЫН ПАРАМЕТРЛЕРІНІҢ NO<sub>x</sub> ЭМИССИЯСЫНА ӘСЕРІ**

*Мақалада жану камерасындағы ағын параметрлерінің NO<sub>x</sub> эмиссиясына әсері анализденеді. Термиялық және жылдам NO<sub>x</sub> деңгейіне қысымның, жану камерасындағы газдардың болу уақытының, отын мен ауаның араласу дәрежесінің әсерлері зерттеледі. Зерттеу нәтижелері жылдам NO<sub>x</sub> эмиссиясы жану камерасындағы қысымға тәуелді емес екенін көрсетеді. Жалын температурасының жоғарылауы жылу NO<sub>x</sub>-тің ғана емес, сонымен қатар жылдам NO<sub>x</sub>-тің пайда болуы жылдамдығын арттыратынын көрсетеді. Отын мен ауаны араластыру параметрі ретінде орташа эквиваленттік коэффициенттің ауытқуының орташа эквиваленттік коэффициентке қатынасы таңдалады. Алдын ала араластырылған қоспаларды жалын температурасы <1950 К және жану аймағында қысқа болу уақыты кезде жағу термиялық NO<sub>x</sub> көлемін барынша азайтуды және жалпы NO<sub>x</sub> эмиссиясының төмен деңгейіне қол жеткізуді қамтамасыз ететіні көрсетілген. Алынған тәуелділіктер негізінде азот оксидінің шығарындылары O<sub>2</sub>=15 % кезінде 20 ppm-*

*нен төмен болатын газ турбиналарының жаңу камераларына арналған жаңа жанарғы құрылғыларды құруға қойылатын талаптар тұжырымдалды. Мақала жылу энергетика саласындағы зерттеушілер мен мамандардың қызығушылығын тудырады.*

*Кілтті сөздер: азот оксиді, жаңу камерасы, жылдам NOx, термиялық NOx, газ турбиасы.*

\*A. M. Dostiyarov<sup>1</sup>, S. B. Sadykova<sup>2</sup>, N. R. Kartjanov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Gumarbek Daukeev Almaty University of Energy and Communications, Republic of Kazakhstan, Almaty;

<sup>2,3</sup>L.N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan, Nur-Sultan.

Material received on 13.06.22.

## **EFFECT OF FLOW PARAMETERS IN GAS TURBINE COMBUSTION CHAMBER ON NO<sub>x</sub> EMISSION**

*The article analyzes the influence of flow parameters in the combustion chamber on NO<sub>x</sub> emission. The effect on the level of thermal and prompt NO<sub>x</sub> of pressure, residence time of gases in the combustion chamber, the degree of fuel and air mixing is investigated. The results of the study show that the prompt NO<sub>x</sub> emission does not depend on the pressure in the combustion chamber. Increasing the flame temperature increases the formation of not only thermal NO<sub>x</sub>, but also prompt NO<sub>x</sub>. The ratio of fluctuations of the average equivalence ratio to the average equivalence ratio was chosen as the fuel and air mixing parameter. It has been shown that combustion of premixed mixtures at a flame temperature <1950K and with a short residence time in the combustion zone will ensure the minimization of thermal NO<sub>x</sub> volumes and the achievement of ultra-low NO<sub>x</sub> emission levels in general. The requirements for the creation of new burners for combustion chambers of gas turbines based on the obtained dependences with the level of nitrogen oxide emissions less than 20 ppm at 15 % O<sub>2</sub> are formulated on the basis of the obtained dependences. The article may be of interest to researchers and specialists in the field of thermal power engineering.*

*Keywords: nitrogen oxides, combustion chamber, instantaneous NO<sub>x</sub>, thermal NO<sub>x</sub>, gas turbine.*

Теруге 13.06.2022 ж. жіберілді. Басуға 30.06.2022 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

16,6 Мб RAM

Шартты баспа табағы 23.88. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова

Тапсырыс № 3958

Сдано в набор 13.06.2022 г. Подписано в печать 30.06.2022 г.

Электронное издание

16,6 Мб RAM

Усл. печ. л. 23.71. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова

Заказ № 3958

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

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

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

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

67-36-69

E-mail: [kereku@tou.edu.kz](mailto:kereku@tou.edu.kz)

[www.vestnik-energy.tou.edu.kz](http://www.vestnik-energy.tou.edu.kz)