Оригинальная статья

УДК 662.61.074:665.6
DOI: 10.17277/voprosy.2026.03.pp.017-023

К ВОПРОСУ ИЗУЧЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ НЕФТЕЗАВОДСКИХ ТРУБЧАТЫХ ПЕЧЕЙ НА ВЫХОД ОКСИДОВ АЗОТА

© В. Д. Катин[1,2], А. А. Журавлев[1]✉

[1] *ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», ул. Серышева, 47, Хабаровск, 680021, Российская Федерация;*
[2] *ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», ул. Тихоокеанская, 136, Хабаровск, 680035, Российская Федерация*
✉ sasha0826@mail.ru

Аннотация. Изучено изменение температурного уровня сырья и нефтепродуктов в печах различных технологических установок. Приведена классификация нефтезаводских печей от степени нагрева продукта. Исследованы концентрации оксидов азота в продуктах сгорания цилиндрических печей разного технологического назначения.

Ключевые слова: загрязнение атмосферы; оксиды азота; нефтезаводские трубчатые печи; нефтеперерабатывающие заводы; нормирование выбросов вредных веществ; технологические установки.

Для цитирования. Катин В. Д., Журавлев А. А. К вопросу изучения влияния технологических особенностей нефтезаводских трубчатых печей на выход оксидов азота // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2026. – № 3(101). – С. 017–023. doi: 10.17277/voprosy.2026.03.pp.017-023

On the Study of the Effect of the Technological Characteristics of Refinery Tubular Furnaces on Nitrogen Oxide Emissions

© Viktor D. Katin [1,2], Alexander A. Zhuravlev [1]✉

[1] *Far Eastern State Transport University, 47 Serysheva St., Khabarovsk, 680021, Russian Federation;*
[2] *Pacific National University, 136 Tikhookeanskaya St., Khabarovsk, 680035, Russian Federation*
✉ sasha0826@mail.ru

Abstract. Changes in the temperature level of feedstock and petroleum products in furnaces used in various process units were examined, and a classification of refinery furnaces according to the degree of product heating is presented. The concentrations of nitrogen oxides in the flue gases of cylindrical furnaces of different technological purposes were investigated.

Keywords: air pollution; nitrogen oxides; refinery tubular furnaces; oil refineries; emission standards for hazardous substances; process units.

For citation. Katin V.D., Zhuravlev A.A. On the Study of the Effect of the Technological Characteristics of Refinery Tubular Furnaces on Nitrogen Oxide Emissions, *Voprosy sovremennoj nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2026, no. 3(101), pp. 017-023. doi: 10.17277/voprosy.2026.03.pp.017-023

Введение

Сокращение и укрепление здоровья населения, безопасная среда обитания для человека и его экологическое благополучие определены национальными целями развития Российской Федерации на период до 2030 года согласно Указу Президента РФ № 309 от 07.05.2024, что также отвечает положениям и требованиям действующего в настоящее время ФЗ «Об охране окружающей среды».

По литературным данным [1 – 4], в современных условиях наиболее актуальным становится сокращение выбросов токсичных и экологически опасных вредных веществ: оксидов азота (NO_x), при эксплуатации трубчатых технологических печей на отечественных нефтеперерабатывающих заводах (**НПЗ**). Данные загрязняющие вещества образуются в значительных количествах даже при нормальном режиме горения топлива, то есть при полном его сжигании [2, 5]. По данным [2], токсичность продуктов сгорания газообразного топлива на 90 – 95 % определяется содержанием в них наиболее токсичных NO_x, поскольку в случае полного сжигания в дымовых газах отсутствуют оксид углерода, сажистые частицы и углеводороды.

В реальных условиях учитывая повышенные эколого-технические требования, предъявляемые к нефтезаводскому оборудованию, можно предположить, что борьба за сокращение выбросов NO_x из нефтезаводских печей будет только усиливаться. Из анализа современных механизмов образования NO_x при горении топлива, подробно рассмотренных в работах [2, 6], снижение выбросов термических NO_x связано с воздействием на максимальную температуру горения. Поэтому разработка мер по уменьшению загрязнения воздушного бассейна связана с нормированием выбросов промышленных предприятий, в том числе НПЗ, а также сбором исходных данных для годового и перспективного планирования воздухоохранных мероприятий применительно к технологическим печам, как основным источникам загрязнения атмосферы.

Особенности учета влияния технологического назначения трубчатых печей по их энергоемкости

Следует отметить, что в настоящее время отраслевые проектные организации практически не имеют руководящих документов и каких-либо рекомендаций по проектированию трубчатых печей переработки нефти с пониженным выбросом NO_x.

Это связано прежде всего с малой изученностью влияния технологического назначения трубчатых печей нефтеперерабатывающих и нефтехи-

мических производств на уровень образования токсичных веществ, включая NO_x. По данным авторских исследований, в табл. 1 представлены результаты экспериментальных наблюдений за изменением температурного уровня нефтепродукта или сырья в технологических печах различных установок.

В зависимости от степени нагрева нефтепродукта технологические печи условно разделены на четыре группы [5]:

– весьма энергоемкие (коробчатого или шатрового типа), применяемые в технологических установках первичной переработки нефти и характеризующиеся высокой степенью нагрева нефти Δt = 120…150 °С;

– энергоемкие (коробчатые и другого типа), применяемые для нагрева газосырьевой смеси в установках риформинга и характеризующиеся достаточно умеренной степенью нагрева Δt = 115°С;

– умеренно энергоемкие (различной конструкции), применяемые для подогрева газосырьевой смеси или поддержания постоянной температуры сырья или полупродуктов в установках АТ, гидроочистки и характеризующиеся степенью нагрева, равной Δt = 20…75 °С;

– малоэнергоемкие, в основном цилиндрической конструкции, применяемые в качестве кипятильников для расщепления тяжелых углеводородов (C_9 и более), характеризующиеся малой степенью нагрева Δt = 5…20°С.

Полученные опытные данные по степени нагрева нефтепродукта в дальнейшем учтены при оценке максимальных температур в топке печей, оказывающих существенное влияние на уровень образования NO_x.

Таблица 1

Изменение температурного уровня нефтепродукта в печах различного технологического назначения

Нагреваемый нефтепродукт или сырье	Технологическая установка	Тип печей	Температура нефтепродукта, °С	
			на входе	на выходе
Отбензиненная нефть	АТ и ВТ	Коробчатые, шатровые	220…230	350…370
Стабильный гидрогенизат	Каталитический риформинг	Цилиндрические	200	240
Газосырьевая смесь	Гидроочистка		315…330	370…390
Сырье или полупродукт	Стабилизация на АТ	Коробчатые	135…180	190…200
Тяжелые углеводороды	Расщепление на установке орто- и паракссилолов	Цилиндрические	196	215
Газосырьевая смесь	Риформинг	Коробчатые	305	420

Экспериментальные исследования цилиндрических печей разного технологического назначения и методика измерения

Проведенные экспериментальные исследования предусматривали установление влияния технологического назначения трубчатых печей одной и той же конструкции (вертикально-цилиндрического типа) на выход оксидов азота в продуктах сгораниях газообразного топлива.

Для измерения концентраций в NO_x в дымовых газах использован современный прибор газоанализатор Testo-350. В целях проверки надежности его показаний проведена выборка из 10 замеров при неизменных технологических условиях, подвергнутая статистическому анализу. Рассчитаны среднее арифметическое выборки $\overline{X}$, дисперсия S^2, среднеквадратичное отклонение S и коэффициенты вариации V, равные по величине $V = \left(S / \overline{X}\right) \cdot 100\,\%$. Результаты обработки замеров показали достаточную однородность.

Данные выполненных исследований условий образования и выхода NO_x в продуктах сгорания трубчатых печей различных технологических установок НПЗ приведены в табл. 2 [5].

Таблица 2

Концентрации оксидов азота в выбросах вертикально-цилиндрических печей различного технологического назначения

Нагреваемый продукт	Технологический процесс	Тепловая мощность	Температура нефтепродукта, °С		Концентрация NO_x, мг/м^3
			на входе	на выходе	
Газосырьевая смесь	Риформинг	13,4	305	420	170
	Получение орто- и параксилолов	10,5	350	420	160
	Гидроочистка	3,4	320	370	160
Сырье или продукт	Гидроочистка	5,2	290	340	160
Полупродукт	Стабилизация на АТ	3,5	190	210	210
Тяжелые углеводороды	Получение орто- и параксилолов	3,1	156	161	205
	Расщепление на установке орто- и параксилолов	5,6	196	215	210
Стабильный гидрогенизат	Каталитический риформинг	6,5	200	240	210

Обсуждение результатов измерений

Если условно принять для исследованных технологических печей, что теплоемкость сырья в заданном интервале температур считается постоянной, то при определенной скорости движения продуктов по трубам теплоотвод от зоны горения и уровень максимальных температур в топке будут зависеть от перепада температуры сырья на входе и выходе трубчатой печи. На уровень выхода оксидов азота для трубчатых печей примерно одинаковой тепловой мощности оказывает влияние степень нагрева нефтепродукта, которая в свою очередь определяется технологическим назначением печей (см. табл. 2).

Повышенное значение концентрации NO_x (205…210 мг/м^3) характерно для печей с незначительной степенью нагрева нефтепродуктов. Таким образом, неодинаковая степень нагрева нефтепродукта для различных технологических процессов оказывает существенное влияние на уровень выхода оксидов азота в продуктах сгорания. В отдельных опытах наблюдался значительны выброс NO_x, несмотря на высокую степень нагрева теплоносителя (см. табл. 2), что можно объяснить различными физико-химическими свойствами нагреваемого нефтепродукта (теплоемкостью и др.), определяющими интенсивность теплоотвода от зоны горения к экранным поверхностям и продукту. Выполненные авторские исследования свидетельствуют о том, что степень нагрева нефтепродукта в печах оказывает существенное влияние на уровень максимальных температур в топке и на выход NO_x в продуктах сгорания.

Заключение

На основании анализа результатов исследований сделаны следующие выводы:

– обосновано и определено, что технологическое назначение трубчатых печей играет несомненно важную роль при установлении выбросов оксидов азота трубчатыми печами;

– разработана и предложена авторская классификация технологических печей по величине степени нагрева нефтепродукта или сырья;

– дан анализ выбросов NO_x для вертикальных цилиндрических печей различных технологических установок;

– полученные опытные данные могут быть использованы проектировщиками, технологами и экологами на отечественных НПЗ для составления предварительных норм ПДВ для однотипных трубчатых печей, а также для планирования мероприятий по охране воздушного бассейна от выбросов NO_x.

Финансирование

Настоящее исследование не получило внешнего финансирования.

Funding

The present study did not receive any external funding.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest.

Список литературы

1. Сигал, И. Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива / И. Я. Сигал. – Санкт-Петербург : Недра, 1998. – 312 с.

2. Трубчатые нагревательные печи нефтепереработки и нефтехимии / А. Б. Жидков, Д. П. Герасимов, Д. Е. Денисов [и др.] ; под ред. А. Б. Жидкова. – Санкт-Петербург :АртПроект, 2015. – 102 с.

3. Очистка дымовых газов тепловых агрегатов от оксидов азота методом некаталитического восстановления / О. Н. Кулиш, С. А. Кужеватов, И. Ш. Глейзер [и др.] // Экология и промышленность России. – 2015. – № 9. – С. 12–16.

4. Катин, В. Д. Проблемы сокращения вредных выбросов в атмосферу из нефтезаводских печей / В. Д. Катин, С. В. Булгаков. – Хабаровск : ТОГУ, 2019. – 192 с.

5. Катин, В. Д. Повышение эффективности использования топлива в трубчатых печах НПЗ и охрана окружающей среды / В. Д. Катин. – Хабаровск : РИОТИП, 2004. – 239 с.

References

1. Sigal, I.Ya. *Zashchita vozdushnogo basseyna pri szhiganii topliva* [Protection of the Air Basin during Fuel Combustion], St. Petersburg: Nedra, 1998, 312 p. (In Russ.)

2. Zhidkov A.B. (Ed.), Gerasimov D.P., Denisov D.E. [et al.]. *Trubchatye nagrevatel'nye pechi neftepererabotki i neftekhimii* [Tubular Heating Furnaces in Oil Refining and Petrochemistry], St. Petersburg: ArtProekt, 2015, 102 p. (In Russ.)

3. Kulish O.N., Kuzhevatov S.A., Gleizer I.Sh. [et al.]. [Flue Gas Cleaning from Nitrogen Oxides in Thermal Units by Non-Catalytic Reduction], *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2015, no. 9, pp. 12-16. (In Russ., abstracr in Eng.)

4. Katin V.D., Bulgakov S.V. *Problemy sokrashcheniya vrednykh vybrosov v atmosferu iz neftezavodskikh pechey* [Problems of Reducing Harmful Emissions into the Atmosphere from Oil Refinery Furnaces], Khabarovsk: TOGU, 2019, 192 p. (In Russ.)

5. Katin V.D. *Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya topliva v trubchatykh pechakh NPZ i okhrana okruzhayushchey sredy* [Improving Fuel Efficiency in Refinery Tubular Furnaces and Environmental Protection], Khabarovsk: RIOTIP, 2004, 239 p. (In Russ.)

Сведения об авторах

Катин Виктор Дмитриевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», Хабаровск, Российская Федерация; профессор Высшей школы управления природными ресурсами ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск, Российская Федерация; ORCID 0009-0008-3403-6024; e-mail: bgd@festu.khv.ru

Журавлев Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», Хабаровск, Российская Федерация; ORCID 0009-0008-5111-3108; e-mail: bgd@festu.khv.ru

About the authors

Viktor D. Katin – D. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Techno-Sphere Safety, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russian Federation; Professor of the Graduate School of Natural Resource Management, Pacific National University, Khabarovsk, Russian Federation; ORCID 0009-0008-3403-6024; e-mail: bgd@festu.khv.ru

Alexander A. Zhuravlev – Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Department of Techno-Sphere Safety, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russian Federation; ORCID 0009-0008-5111-3108; e-mail: bgd@festu.khv.ru

Дата поступления 22.07.2026;
после рецензирования 29.08.2026;
дата принятия 01.09.2026

© В. Д. Катин, А. А. Журавлев, 2026. Данная статья находится в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии Creative Commons Attribution (CC BY) https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/