

УДК 504.06

**О. А. Баландина**

*Самарский государственный технический университет*

## **ОБЗОР ВЛИЯНИЯ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА СОСТАВ ВЫБРОСОВ ПРИ СЖИГАНИИ ПРИРОДНОГО ГАЗА**

Приведены результаты анализа опытно-промышленных исследований влияния режимных параметров горения на генерацию основных токсичных компонентов для котельных агрегатов средней и большой паропроизводительности в условиях сжигания природного газа. Рассмотрены вопросы влияния термодинамических характеристик процесса горения на конверсию продуктов неполного сгорания метана как основного компонента природного газа. Определена максимальная температура (1473 °С), ниже которой увеличивается вероятность образования бенз(а)пирена в топочной камере агрегата по радикально-цепному ацетиленовому механизму.

**Ключевые слова:** очистка воздуха, выбросы ТЭЦ, загрязнение атмосферы, бенз(а)пирен, окислы азота, оксид углерода, теплоснабжающее предприятие, дымовые газы, нейтрализация.

### **Введение**

В основополагающем документе<sup>1</sup>, определяющем направления экологической стратегии России до 2030 г., подчеркивается, что значительное влияние человека на окружающую среду является ключевым фактором, формирующим экологическое состояние в стране. В 40 регионах Российской Федерации свыше половины жителей городов живут в условиях, где уровень загрязнения атмосферы достигает высоких или крайне высоких отметок [1]. Для крупных промышленных городов проблема чистоты воздуха стоит особенно остро [2].

Здоровье городского населения и чистота атмосферного воздуха в немалой степени зависят от выбросов предприятий теплоэнергетического комплекса, которые обычно располагаются в городских агломерациях [3].

Увеличение негативного воздействия на воздушную среду происходит в процессе выработки энергии, получаемой при сжигании углеводородов. Даже при сжигании такого относительно чистого вида топлива, как природный газ, невозможно полностью избежать выбросов вредных веществ. В результате в воздух попадают опасные соединения, включая окислы азота, диоксид углерода и бенз(а)пирен (БаП) [4, 5].

Интенсивность генерации основных токсичных компонентов дымовых газов может меняться под воздействием различных факторов. Среди них — степень рециркуляции дымовых газов (РДГ), организация схемы ступенчатого сжигания газа, а также температурные условия в ядре горения [6, 7]. Объем рециркулируемых газов и способ организации вторичного дутья при ступенчатом сжигании топлива оказывают существенное влияние на уровень кислородного баланса топки. Согласно опытно-промышленным исследованиям [8, 9] содержание СО минимально при избытке окислителя, а концентра-

<sup>1</sup> Основы государственной политики в области экологического развития России на период до 2030 года (утв. 30.04.2012). URL: <https://www.consultant.ru/>.

ция  $\text{NO}_x$  изменяется в зависимости от коэффициента избытка воздуха, образуя кривую с пиковым значением в интервале  $\alpha_{\text{opt}} = 1,1 \dots 1,3$ .

Однако на данный момент известные исследования ограничиваются анализом данных для оборудования высокой паропроизводительности, рассчитанного на сверхвысокие параметры пара (котлоагрегаты ТГМ-94, ТПЕ-430). Учитывая, что вариации в распределении и интенсивности пиковых концентраций загрязнителей могут быть обусловлены как мощностью энергоустановок, так и разнообразием конфигурации топочных камер, значительную актуальность приобретают вопросы анализа условий образования и снижения токсичных компонентов выбросов для установок более низкой производительности.

*Целью* данного исследования является уточнение условий генерации основных токсичных компонентов дымовых газов для энергоустановок средней производительности в зависимости от влияния режимных параметров процесса горения.

#### **Методология**

Для подтверждения соответствия между ранее выявленными закономерностями [9, 10] и экологическими показателями оборудования средней паропроизводительности [11, 12] выполнен сравнительный анализ влияния топочных условий при сжигании природного газа на содержание вредных веществ в выбросах.

Исходные данные для анализа показателей оборудования средней паропроизводительности принимались по данным режимных карт и режимно-наладочных испытаний двух разных моделей стандартных энергокотлов, находящихся в эксплуатации структурных подразделений филиала «Самарский» ПАО «Т плюс».

В число исследованных агрегатов вошел стационарный котел № 9 типа БКЗ-220-100 ПТ, функционирующий в составе оборудования Безымянской ТЭЦ. В качестве основного топлива используется природный газ с теплотворной способностью  $7990 \text{ ккал/нм}^3$ . Топка котла разделена на 2 яруса, в каждом из которых смонтированы 4 прямоточно-вихревые горелки конструкции АОТ «НПО ЦКТИ». С целью снижения выбросов окислов азота на агрегате предусмотрена подача рециркуляционных газов в зоне выхода горячего воздуха из воздухоподогревателя второй ступени [12].

Также к анализу принимались показатели экологической эффективности котла НЗЛ-110, входящего в состав энергооборудования Самарской ГРЭС [11]. Основным топливом, сжигаемым в камерной топке этого котла, является природный газ с теплотворной способностью  $8425 \text{ ккал/нм}^3$ . Конструкция экранированной топки котельной установки включает в себя несколько ключевых элементов: фронтальной, задней и боковые экраны, а также сеть трубопроводов — кипятильный пучок, боковые сядки и коллекторы. С целью снижения выбросов  $\text{NO}_x$  в атмосферу на котле используется схема вторичного дутья. Подача воздуха осуществляется через сопла, которые размещены над горелками фронтальной стены топки [11].

#### **Результаты**

Анализ результатов выполнялся с использованием приведенных к  $\alpha = 1,4$  значений фактических концентраций  $\text{CO}^{\text{изм}}$  и  $\text{NO}_x^{\text{изм}}$  [12]:

$$\text{NO}_x^{\text{пр}} = \frac{k\text{NO}_x^{\text{изм}}(\text{ppm})\alpha}{1,4}, \text{ мг/нм}^3, \quad (1)$$

$$\text{CO}^{\text{пр}} = \frac{k\text{CO}^{\text{изм}}(\text{ppm})\alpha}{1,4}, \text{ мг/нм}^3, \quad (2)$$

где  $k$  — коэффициент пересчета;  $\alpha$  — коэффициент избытка воздуха.

В качестве регулируемого параметра для различных диапазонов применялся коэффициент соотношения воздуха к топливу 1,08...1,55 для котельного агрегата БКЗ-220-100 ПТ и 1,28...1,51 для НЗЛ-110 [11, 12]. Нагрузка котлов принималась по данным режимных карт: от 113 до 220 т/ч при определении выбросов от БКЗ-220-100 ПТ и в диапазоне 55...110 т/ч для НЗЛ-110. Подача влаги в виде жидкости или пара в топочные камеры котлов не предусмотрена. Результаты проведенного сравнительного анализа, отражающие влияние избытков воздуха на содержание  $\text{NO}_x$  и  $\text{CO}$  в дымовых газах, представлены на рис. 1, 2.

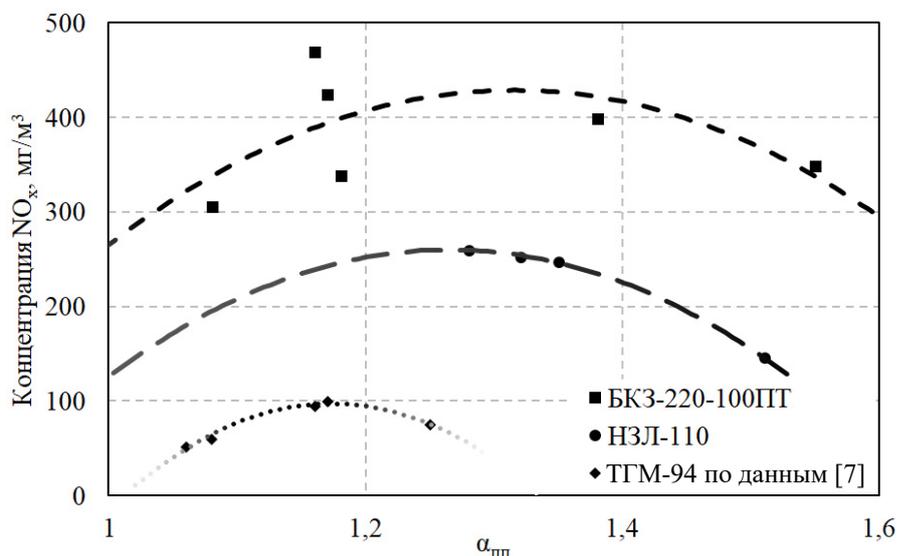


Рис. 1. Зависимость концентрации окислов азота в уходящих газах при изменении соотношения воздуха к топливу в процессе горения

Одним из негативных аспектов, связанных с использованием метода РДГ для снижения выбросов  $\text{NO}_x$ , является риск повышения уровня концентрации БаП по мере увеличения доли рециркулируемых газов. В данной ситуации появление соединения  $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$  можно объяснить охлаждением горящего факела и нехваткой воздуха, который требуется для поддержания процесса горения.

В рамках анализа осуществлен расчет концентрации БаП в уходящих газах агрегатов средней паропроизводительности БКЗ-220-100 ПТ и НЗЛ-110. Исследование базировалось на методологии, установленной в стандарте

СО 153-34.02.316—2003<sup>2</sup>, и включало тщательный разбор множества аспектов, от значения доли рециркуляции, паропроизводительности и режимно-технологических характеристик до параметров топочного процесса. Итоговые показатели выбросов  $C_{20}H_{12}$  могут иметь погрешность до 20 %, что обусловлено спецификой использованной методики оценки. Сопоставление результатов расчета по методике СО 153-34.02.316—2003 с данными промышленных исследований представлено на рис. 3.

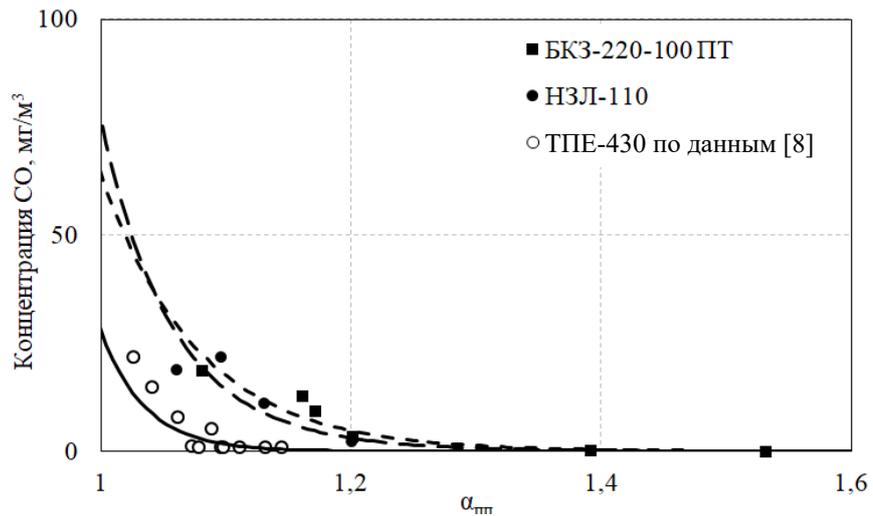


Рис. 2. Зависимость содержания монооксида углерода в уходящих газах при изменении соотношения воздуха к топливу в процессе горения

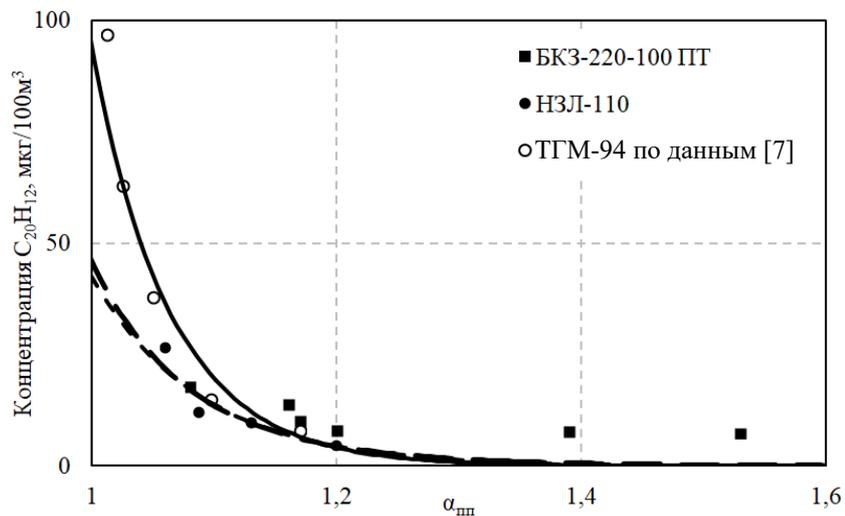


Рис. 3. Зависимость содержания БаП в уходящих газах при изменении соотношения воздуха к топливу в процессе горения

<sup>2</sup> СО 153-34.02.316—2003 (РД 153-34.1-02.316—2003) Методика расчета выбросов бенз(а)пирена в атмосферу паровыми котлами электростанций (утв. приказом Минэнерго России от 30.06.2003 № 286). М. : ОАО «ВТИ», 2007. 9 с.

Анализ полученных графических зависимостей (см. рис. 1—3) позволил сделать следующие заключения:

1. При работе котлов средней производительности в условиях сниженной нагрузки наблюдается более высокое содержание окислителя в топках по сравнению с котлами высокой мощности [9, 10]. Вместе с тем в отношении исследуемых загрязнителей прослеживается та же динамика, что и в опытно-промышленных исследованиях, а именно:

- повышение содержания окислителя способствует уменьшению образования продуктов, таких как монооксид углерода (СО) и БаП (C<sub>20</sub>H<sub>12</sub>), которые формируются при неполном сгорании природного газа;
- в интервале коэффициента избытка воздуха от 1,2 до 1,3 наблюдаются максимальные концентрации окислов азота.

2. Исходя из значений концентрации NO<sub>x</sub>, превышающих максимально допустимый уровень, что относится и к котлу модели БКЗ-220-100 ПТ, и к котлу НЗЛ-110 (255 мг/м<sup>3</sup>)<sup>3</sup>, можно предположить, что принятых мер по снижению выбросов токсичных компонентов дымовых газов недостаточно (РДГ, ступенчатое сжигание газа).

Также по графическим зависимостям (см. рис. 1—3) можно предположить, что достижение оптимального соотношения «топливо-окислитель», позволяющего одновременно прекратить генерацию основных токсичных компонентов выбросов, представляет существенную трудность. Для выявления технического решения, способного комплексно снизить выбросы по всем трем основным загрязнителям целесообразно рассмотреть влияние основного режимного фактора — абсолютной температуры. Ранее автором рассматривались вопросы влияния термодинамических характеристик условий горения на уровень выделения NO<sub>x</sub> и СО в дымовых газах от котельных установок [13, 14]. В данном исследовании предлагается рассмотреть аспекты влияния термодинамических характеристик процесса горения на генерацию продуктов неполного сгорания метана, как основного компонента природного газа.

При горении природного газа в условиях недостатка окислителя, что характерно для схемы РДГ, часть метана разлагается на углерод и водород, при этом одним из промежуточных процессов данной реакции является реакция образования ацетилена [15]:



Для анализа процессов образования ацетилена при сжигании природного газа проведены расчеты динамики изменения энергии Гиббса реакции (3) для температурного диапазона 0...1900 °С (рис. 4).

Термодинамический анализ реакции (3) показывает (см. рис. 4), что при температуре, превышающей отметку в 1437 °С процесс формирования ацетилена наиболее вероятен. Это подтверждается показателями энергии Гиббса,

<sup>3</sup> СТО 70238424.13.020.30.002—2010. Методика расчета и установления максимальных допустимых удельных выбросов для действующих котельных установок тепловых электростанций (от 28.06.2021 № 22-р с изм. от 26.12.2022 № 38-р). М. : Инновации в электроэнергетике, 2010. 20 с.

которые принимают отрицательные значения. Учитывая, что температура пламени при горении метана достигает 1900 °С [16], можно предположить высокую степень вероятности образования БаП при сжигании природного газа в топках котлов по сценарию ацетиленового механизма.

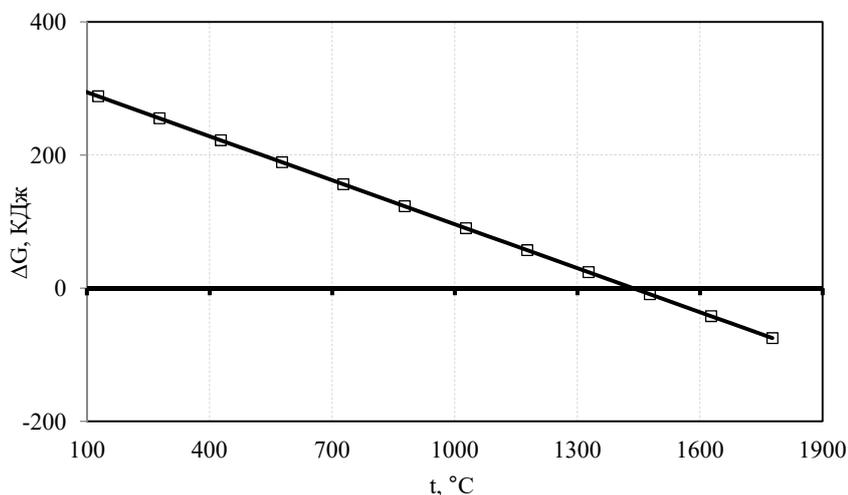


Рис. 4. Зависимость изменения энергии Гиббса от абсолютной температуры процесса генерации ацетилена при горении природного газа

В работах авторов [17—19] рассмотрены процессы образования БаП по радикально-цепному ацетиленовому механизму. При этом в процессе реагирования ацетилен превращается в этильный радикал ( $C_2H$ ), который за счет присоединения углеводородных соединений образует сначала молекулу ди-ацетилена ( $C_4H_2$ ), а далее полииновую молекулу ( $C_6H_2$ ), которая затем трансформируется в молекулу БаП:



Результаты оценки вероятности образования БаП, согласно вышеописанному сценарию, выполненные на основе расчетов изменения энергии Гиббса для условий топочного процесса, представлены на рис. 5.

Образование БаП путем роста этильного радикала наиболее вероятно в результате снижения температуры факела, что демонстрирует переход аппроксимирующих прямых в зону отрицательных значений изменений энергии Гиббса при температуре ниже 1473 °С.

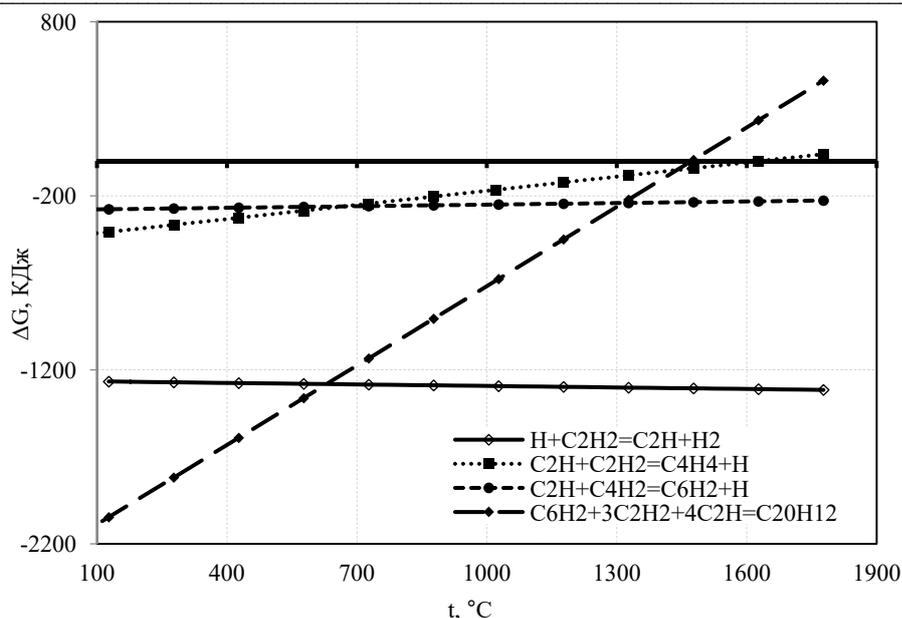


Рис. 5. Зависимость изменения энергии Гиббса от абсолютной температуры образования БаП по радикально-цепному ацетиленовому механизму

### Обсуждение

Проведенные исследования позволили определить условия генерации токсичных компонентов дымовых газов в зависимости от влияния режимных параметров процесса горения. На примере действующего энергетического оборудования средней паропроизводительности определено влияние снижения концентрации окислителя вследствие применения методов РДГ и ступенчатого сжигания газа на образование  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$  и БаП. Полученные результаты показали высокую степень аппроксимации с данными ранее проведенных опытно-промышленных исследований [9, 10].

Анализ данных термодинамического расчета выявил высокую вероятность роста уровня выбросов БаП при использовании технологических мер, направленных на снижение выбросов окислов азота и оксида углерода, получивших широкое распространение на многих ТЭЦ центрального региона России. Выявлено, что образование БаП напрямую связано со снижением температуры факела и определены температурные параметры топочного процесса (ниже  $1473^\circ\text{C}$ ), при которых образование  $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$  наиболее вероятно. Заключение о высокой степени вероятности образования БаП в основном в топочной камере также согласуется с выводами других исследователей [20].

### Выводы

1. При сжигании природного газа в котлах средней паропроизводительности (БКЗ-220-10 ПТ, НЗЛ-110) просматривается та же динамика генерации основных токсичных компонентов выбросов, что и для котлов большой производительности (ТГМ-94, ТПЕ-430). Однако исследования выявили увеличение количества выбросов основных загрязнителей для агрегатов меньшей производительности, что может быть связано с конструктивными особенно-

стями горелок и различиями в аэродинамических процессах в топках за счет их конфигурации.

2. Распространенные на ТЭЦ методы РДГ с целью снижения уровня выбросов окислов азота приводят к увеличению степени генерации продуктов неполного сгорания ( $\text{CO}$  и  $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$ ) за счет охлаждения факела и уменьшения коэффициента избытка воздуха в топке.

3. Образование  $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$  начинается в условиях топки, что не противоречит версии, изложенной в источнике [20]. Однако согласно термодинамическим расчетам, процесс генерации БАП начинается при температуре ниже  $1473^\circ\text{C}$ , что расширяет представление о граничных условиях его образования.

С учетом полученных выводов можно предположить, что техническое решение, направленное на комплексное снижение выбросов трех наиболее опасных загрязнителей не должно оказывать влияние на организацию процесса горения. В свете этого каталитическая нейтрализация как один из самых эффективных подходов к очистке газов представляется оправданным выбором. Полная оценка целесообразности применения данного метода требует глубокого анализа множества аспектов, что неизбежно приводит к необходимости проведения дополнительных научных исследований.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Галазова З. В., Шаропатова А. В. Проблемы реализации политики государства в области экологической безопасности и организации ответственного производства и потребления // Вестник Владикавказского научного центра. 2021. Т. 21. №. 4. С. 80—83.
2. Сергина Н. М., Брызгина Е. О., Сущенко Р. В., Азарова М. Д. Сравнение уровня загрязнения частицами  $\text{PM}_{10}$  и  $\text{PM}_{2.5}$  атмосферного воздуха на территориях парков в промышленных городах с разным климатом // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2023. Вып. 5(93). С. 168—175.
3. Литвинова Н. А., Азаров В. Н. О модели вертикального распределения концентраций загрязняющих веществ по высоте зданий с учетом типа локальной застройки // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. Вып. 3(84). С. 108—121.
4. Hannun R. M., Razzaq A. H. A. Air pollution resulted from coal, oil and gas firing in thermal power plants and treatment: A review // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 1002. No. 1. Pp. 012008.
5. Hannun R. M., Razzaq A. H. A. Numerical simulation to evaluate air pollutants resulting from fuel combustion in a thermal power plant under different conditions // Mathematical Statistician and Engineering Applications. 2022. Vol. 71. No. 4. Pp. 5977—5999.
6. Бусыгин С. В., Ковальников В. Н., Чукалин А. В. Математическое моделирование и исследование эффективности рециркуляции дымовых газов в энергетических котлах // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2021. Т. 10. №. 4(56). С. 12—15.
7. Mitigation approaches and techniques for combustion power plants flue gas emissions: A comprehensive review / I. Larki, A. Zahedi, M. Asadi, M. M. Forootan, M. Farajollahi, R. Ahmadi, A. Ahmadi // Science of The Total Environment. 2023. Pp. 166108.
8. Султанов Е. В., Булушев Д. А., Акинин Н. И., Смирнов С. П. Количественное определение оксидов азота (II) в продуктах взрыва модельных промышленных составов на основе нитрата аммония // Успехи в химии и химической технологии. 2022. Т. 36. № 10(259). С. 124—128.
9. Жуйков А. В. Снижение оксидов азота в топках котлов // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2011. Т. 4. № 6. С. 620—628.
10. Грига А. Д., Иваницкий М. С. Влияние коэффициента избытка воздуха при сжигании топлива на выбросы бенз(а)пирена // Теплофизические основы энергетических технологий: сб. науч. тр. IV всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Томск : ТПУ, 2013. С. 232—235.

11. *Гаврилов В. К.* Отчет по результатам проведенных испытаний на котле типа НЗЛ-110 ст. 3 Сам ГРЭС филиала Самарский ПАО «Т Плюс» после капитального ремонта 2017 год.: 2020.
12. *Жмерик Н. Г.* Безымянская ТЭЦ. Разработка и внедрение системы рециркуляции дымовых газов котла № 9 с целью снижения выбросов NOx: отчет ОНП // НПО «Центральный котлотурбинный институт им. И. И. Ползунова». СПб, 2001. 43 с.
13. *Баландина О. А., Пуринг С. М., Филатова Е. Б.* Термодинамический анализ реакций образования оксида углерода в дымовых газах котельных установок с целью определения температурного диапазона эффективной работы катализатора // Промышленная энергетика. 2020. № 3. С. 47—53.
14. *Balandina O. A., Puring S. M., Vatuzov D. N., Filatova E. B.* A study of the effect of air temperature on the possibility and rate of formation of nitrogen oxides in boiler flue gases // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 791. No. 1. P. 012005.
15. *Chunxia H. U., He S. H. E. N., Zhan S., Hejun L. I.* Methane pyrolysis in preparation of pyrolytic carbon: Thermodynamic and kinetic analysis by density functional theory theory // Chinese Journal of Aeronautics. 2020. Vol. 33. No. 3. Pp. 1064—1073.
16. *Болодьян И. А., Возман Л. П., Корольченко Д. А.* Экспериментально-аналитические исследования пожарной опасности материалов, применяемых в оборудовании с обогащенными кислородом средами при повышенных давлениях, и пути снижения их горючести // Пожаровзрывобезопасность. Т. 32. № 3. С. 17—30.
17. *Матвеев С. Г.* О роли ацетилена как продукта пиролиза исходного топлива в механизмах синтеза бенз(а)пирена // Вестник СГАУ. Серия: Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей. 2000. Вып. 3. С. 153—162.
18. First principles reaction discovery: from the Schrodinger equation to experimental prediction for methane pyrolysis / R. Xu, J. Meisner, A. M. Chang, K. C. Thompson, T. J. Martínez // Chemical Science. 2023. Vol. 14. No. 27. Pp. 7447—7464.
19. *Rudolph C., Atakan B.* Pyrolysis of methane and ethane in a compression-expansion process as a new concept for chemical energy storage: a kinetic and energetic investigation // Energy Technology. 2021. Vol. 9. No. 3. P. 2000948.
20. *Elsukov V. K., Latushkina S. V.* Formation features of benz(a)pyrene and nitrogen oxides when burning brown coal in boilers with liquid slag removal system // Journal of Physics: Conference Series. 2022. Vol. 2233. Iss. 1. Pp. 012012.

© Баландина О. А., 2024

Поступила в редакцию  
в июне 2024 г.

Ссылка для цитирования:

*Баландина О. А.* Обзор влияния режимных параметров на состав выбросов при сжигании природного газа // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2024. Вып. 3(96). С. 115—124. DOI: 10.35211/18154360\_2024\_3\_115.

Об авторе:

**Баландина Ольга Александровна** — старший преподаватель, Самарский государственный технический университет (СамГТУ). Российская Федерация, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244; balandinaolya88@rambler.ru

**Olga A. Balandina**

**Samara State Technical University**

## REVIEW OF THE INFLUENCE OF OPERATION PARAMETERS ON THE COMPOSITION OF EMISSIONS FROM NATURAL GAS COMBUSTION

The results of the analysis of experimental and industrial studies of the influence of gorenje regime parameters on the generation of the main toxic components for boiler units of medium and high steam capacity, in conditions of natural gas combustion, are presented. The issues of the influence of

thermodynamic characteristics of the combustion process on the conversion of incomplete combustion products of methane, as the main component of natural gas, are considered. Gorenje the maximum temperature (1473 °C) has been determined, below which the probability of benzopyrene formation in the furnace chamber of the unit increases by the radical chain acetylene mechanism.

**К e y w o r d s:** air purification, CHP emissions, atmospheric pollution, benzopyrene, nitrogen oxides, carbon monoxide, heat supply company, flue gases, neutralization.

*For citation:*

Balandina O. A. [Review of the influence of operation parameters on the composition of emissions from natural gas combustion]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2024, iss. 3, pp. 115—124. DOI: 10.35211/18154360\_2024\_3\_115.

*About author:*

**Olga A. Balandina** — Senior Lecturer, Samara State Technical University (SSTU). 244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation; balandinaolya88@rambler.ru