

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-5-450-461>

УДК 662.76:504.064:683.95 (045)

Экологические характеристики современных систем бытового использования топлива

Часть 2

Образование вредных веществ при сжигании природного газа в атмосферных горелках: экспериментальные исследования

Б. С. Сорока¹⁾, В. В. Горупа¹⁾

¹⁾Институт газа Национальной академии наук Украины (Киев, Украина)

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. В Институте газа НАН Украины выполняются комплексные исследования формирования токсичных выбросов в пламени атмосферных горелок и за пределами видимых горящих конусов («богатое» первичное пламя). Проведение экспериментов обусловлено доказанным существенным содержанием вредных веществ в продуктах сгорания газового топлива в бытовых приборах и непосредственным контактом потребителей с газовыми выбросами при работе плит. Предложена методология изучения образования вредных выбросов, изготовлен огневой компьютеризованный стенд для исследования сжигания углеводородных газов в горелках бытовых плит. В качестве токсичных выбросов рассматриваются оксиды углерода CO и азота NO и NO₂, а как варьируемые параметры приняты коэффициент избытка первичного воздуха и тепловая нагрузка горелки. В условиях эксплуатации газовой плиты ее варьируемые характеристики – это давление газа перед соплом атмосферной горелки и ее тепловая мощность. При оптимизации конструкции горелок определяющей величиной устойчивости горения, энергетических и экологических показателей сжигания топлива является коэффициент избытка первичного воздуха λ_{pr} при заданном давлении газа перед горелкой. Установлено влияние этого коэффициента на образование CO, NO, NO₂, доказана возможность появления выбросов с высокой концентрацией диоксида азота. Поскольку концентрация [NO] с повышением λ_{pr} уменьшается, а на абсолютный уровень концентраций [NO₂] величина λ_{pr} влияет незначительно, определено, что доля концентрации [NO₂] в смеси [NO_x] = [NO] + [NO₂] возрастает с увеличением коэффициента избытка первичного воздуха.

Ключевые слова: атмосферная горелка, бытовая газовая плита, диагностическое устройство, диоксид азота, загрязнение окружающей среды, компьютеризованный огневой стенд, коэффициент избытка первичного воздуха, оксиды азота, оксид углерода, природный газ

Для цитирования: Сорока, Б. С. Экологические характеристики современных систем бытового использования топлива. Ч. 2. Образование вредных веществ при сжигании природного газа в атмосферных горелках: экспериментальные исследования / Б. С. Сорока, В. В. Горупа // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 5. С. 450–461. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-5-450-461>

Адрес для переписки
Сорока Борис Семенович
Институт газа
Национальной академии наук Украины
ул. Дегтяревская, 39,
03113, г. Киев, Украина
Тел.: +38 044 455-59-98
boris.soroka@gmail.com

Address for correspondence
Soroka Boris S.
The Gas Institute
of the National Academy of Sciences of Ukraine
39, Degtyarevskaya str.,
03113, Kyiv, Ukraine
Tel.: +38 044 455-59-98
boris.soroka@gmail.com

Environmental Characteristics of Modern Systems of Domestic Use of Fuel

Part 2

Pollutants Formation by Natural Gas Combustion in Atmospheric Burners: Experimental Studies

B. S. Soroka¹⁾, V. V. Horupa¹⁾

¹⁾The Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

Abstract. The Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine performs comprehensive studies of the formation of toxic emissions in the flame of atmospheric burners and beyond the visible burning cones ("rich" primary flame). The experiments are based on the proven significant content of harmful substances in the combustion products of gas fuel in household appliances and on direct contact of consumers with gas emissions during the operation of the stoves. A methodology for the experimental researches of the harmful emissions formation has been proposed while the computerized firing rig serving as the diagnostic facility has been developed for studying the combustion of hydrocarbon gases in the burners of household stoves. Carbon oxides CO and nitrogen oxides NO and NO₂ are considered as toxic emissions, while the primary air excess coefficient and the heat load of the burner are considered as variable parameters. Under operating conditions of a gas stove, its variable characteristics are the gas pressure in front of the nozzle of the atmospheric burner and its thermal power. When optimizing the design of burners, the determinant value of the stability of burning, energy and environmental indicators of fuel combustion is the coefficient of excess of primary air λ_{pr} at a given gas pressure before the burner. The influence of this coefficient on the formation of CO, NO, NO₂ is established, and the possibility of emissions with a high concentration of nitrogen dioxide is proved. Since the concentration of [NO] decreases with an increase in λ_{pr} , and the absolute level of [NO₂] concentrations is not significantly affected by the value of λ_{pr} , it is determined that the proportion of [NO₂] concentration in the [NO_x] = [NO] + [NO₂] compound increases with an increase in the primary air excess coefficient.

Keywords: atmospheric burner, household gas stove, diagnostic facility, nitrogen dioxide, environmental pollution, computerized firing rig, primary air excess coefficient, nitrogen oxides, carbon monoxide, natural gas

For citation: Soroka B. S., Horupa V. V. (2020) Environmental Characteristics of Modern Systems of Domestic Use of Fuel. Part 2. Pollutants Formation by Natural Gas Combustion in Atmospheric Burners: Experimental Studies. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (5), 450–461. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-5-450-461> (in Russian)

Введение

Несмотря на кажущуюся малозначимость научных и прикладных аспектов проблемы образования вредных веществ при сжигании топлива в бытовых газовых приборах, указанные процессы существенно влияют на здоровье населения, когда приготовление пищи и нагрев жидкостей обеспечиваются бытовыми газовыми плитами. Такое сильное влияние выбросов вредных веществ от атмосферных горелок кухонных плит вызвано их использованием в условиях ограниченного пространства жилых помещений, зачастую не имеющих вытяжных устройств.

Рассматриваемая проблема изучена мало, а конструкции горелок до сих пор недостаточно совершенны. Вследствие этого в пламенах бытовых

горелок наблюдаются значительные концентрации вредных выбросов, к числу которых обычно относятся оксиды углерода CO и азота NO и NO₂ [1–3].

В отличие от систем сжигания газа в топочных устройствах промышленного и энергетического назначения, в том числе водогрейных котлов, для экологического совершенствования которых рекомендуется «ступенчатое и нестехиометрическое сжигание топлива» [4], системы сжигания топлива в бытовых водонагревателях и газовых плитах комплектуются атмосферными эжекционными горелками. Суть их рабочего процесса состоит в организации двустадийного горения газа с организацией «богатых» пламен на первой стадии горения, с последующим дожиганием факелов с недогоревшими продуктами и разбавлением продуктов завершеного сгорания в окружающем воздухе жилых помещений.

Следует отметить, что ограниченность исследований в области экологии бытового использования газа, в частности применительно к газовым плитам, в некоторой мере компенсируется разработками по образованию вредных веществ при сжигании природного газа в бытовых водонагревателях [5, 6]. Соответствующие исследования, проведенные в США, носят прямой экспериментальный характер и посвящены образованию CO, NO_x при стадийном сжигании газа в атмосферных эжекционных горелках в условиях неуправляемого подвода воздуха-окислителя. Горелки газовых плит и бытовых водонагревателей имеют много общего. Основную часть современных атмосферных горелок указанного назначения составляют так называемые блинообразные горелки (pancake burners) [6], имеющие, как правило, горизонтальное расположение над соплом подачи газовой струи с вертикальной осью.

В [5, 6] рассматривается влияние основных режимных характеристик: коэффициента избытка первичного воздуха λ_{pr} (primary air ratio, primary aeration), общего коэффициента избытка воздуха в дымоходе (overall excess air), включая избыток вторичного воздуха (secondary air excess), а также тепловой нагрузки горелки (firing rate, port loading) на образование токсичных компонент.

В качестве вредных выбросов анализируются приведенные к 3 % O₂ в продуктах сгорания концентрации CO и NO_x [4]. Установлено, что выбросы NO_x сокращаются с ростом λ_{pr} в диапазоне $\lambda_{pr} \in \{0,35-0,6\}$, а концентрация [CO] слабо зависит от λ_{pr} в указанном диапазоне значений первичного избытка воздуха. Получены данные о возможности роста [CO], в том числе существенного, при приближении λ_{pr} к стехиометрическому составу ($\lambda_{pr} \rightarrow 1,0$), в частности в условиях ограниченного подвода вторичного воздуха.

В более поздних исследованиях изучались дополнительные возможности сокращения выбросов вредных веществ за счет рециркуляции продуктов сгорания (FGR). Испытания проводились путем ввода N₂ в метановоздушную смесь.

В [6], где в качестве характеристик состава смеси используются значения коэффициента избытка топлива (equivalence ratio $ER = \lambda^{-1}$), рассмотрена зависимость выбросов NO_x от λ_{pr} при двустадийном сжигании (по данным различных исследований) с указанием на определяющее воздействие пиковых температур в пламени (термический механизм образования NO_x).

Установлено, что индикатор $\text{NO}_x - \text{EINO}_x$ (количество выбросов, отнесенное к 1 кг топлива [7]), по данным Lyle, имеет минимальное значение при $\lambda_{pr} \approx 0,65$; согласно Gore–Zhan, $\lambda_{pr} \approx 0,50$; по данным Kim, – $\lambda_{pr} \approx 0,45$. В качестве общего замечания приводится вывод о том, что $[\text{NO}_x]_{\min}$ соответствует $(ER)_{pr} = \lambda_{pr}^{-1} \in \{1,5-2,2\}$. Что касается $[\text{NO}_x]_{\text{O}_2=3\%}$, то при уменьшении $(ER)_{pr}$ с 4,8 до 2,1 (повышение λ_{pr} от 0,208 до 0,476) наблюдается тенденция к сокращению NO_x . В случае дальнейшего уменьшения $(ER)_{pr} < 2,1$ при общем тренде к сокращению $[\text{NO}_x]$ наблюдается неустойчивая структура пламени.

Выбросы CO , по данным [6], существенны при $(ER)_{pr} > 3,8$ ($\lambda_{pr} < 0,263$), когда наблюдается неполное сгорание, а также появление желтых языков пламени. В случае $(ER)_{pr} < 3,6$ заметно резкое сокращение $[\text{CO}]$ – практически до 0, что вызывает сомнения и требует специального обоснования.

Методология проведения исследований

В Институте газа НАН Украины создан огневой компьютеризованный стенд (рис. 1), предназначенный для определения энергетических (по эффективности использования топлива) и экологических характеристик (по образованию вредных веществ) эжекционных горелок бытовых газовых плит.



Рис. 1. Компьютеризованный огневой стенд

Fig. 1. Computerized firing rig

Измерение температуры воздуха (первичного, вторичного) и горячего газа обеспечивается с помощью промышленного десятиканального модуля ввода

сигналов M-7018Z-G/S и термопар (тип «К»). Обработку и вывод информации в программной среде EZ Data Logger обеспечивает преобразователь-контроллер I-7561U с преобразованием сигналов в USB из RS-232/422/485. Электропитание информационно-измерительной системы осуществлялось промышленным источником питания MEAN WELL MDR-20-24.

Анализ продуктов сгорания и численное определение концентраций оксидов углерода ($[CO]$ и $[CO_2]$), оксидов азота ($[NO]$, $[NO_2]$, $[NO_x]$), кислорода $[O_2]$, оксида серы (SO_2) проводили с помощью промышленных газоанализаторов TESTO 350 XL (Германия), UNIGAS (Италия) и ОКСИ-5М (Украина). В качестве горючего газа в установке предусмотрено использование природного газа, который подается от городской магистрали, а также сжиженного газа из баллона с соответствующим редуцированием.

Химические составы определялись: природного газа – по данным протоколов анализа ближайшей газораспределительной станции (ГРС-ТЭЦ-5), сжиженного газа – в лаборатории Института газа НАН Украины газовым хроматографом Hewlett Packard Agilent HP-5890.

На установке под пирамидальным колпаком были отработаны следующие схемы экспериментальных исследований вредных выбросов:

1) при отсутствии теплоприемной емкости, заполненной нагреваемой водой;

2) при установке теплоприемной емкости с нагреваемой водой.

В обоих случаях использовался пересчет измеренных концентраций токсичных веществ на концентрацию продуктов сгорания с $[O_2] = 3\%$, что для природного газа соответствует коэффициенту избытка воздуха $\lambda = 1,15$ (по фактическому λ и замеренной концентрации $[O_2]$).

Прямое определение выбросов в огневом стенде имеет достоинства и недостатки. Первые состоят в возможности варьирования локальных избытков воздуха в месте отбора проб вплоть до $\lambda \sim 10$ и более (теоретически – до бесконечности). Ограниченность такого подхода обусловлена потерей точности при замерах концентраций, особенно при больших избытках воздуха, в том числе связанной с приборной чувствительностью измерений малых концентраций. Ошибки с замерами малых концентраций при больших значениях коэффициента избытка воздуха сильно сказываются на огрублении замеров при последующем пересчете концентраций $[NO]$, $[NO_2]$, $[CO]$ на состав продуктов сгорания с $[O_2] = 3\%$.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

Задача экспериментальных исследований экологических характеристик атмосферных горелок состояла в получении значений концентраций вредных выбросов – оксидов азота $[NO]$, $[NO_2]$ и углерода $[CO]$ в зависимости от основных режимных параметров работы горелок: коэффициента избытка первичного воздуха λ_{pr} и давления газа перед горелкой Δp_g .

Очевидно, что в эксплуатационных условиях (сжигание газа в плитах) λ_{pr} является единственной фиксированной величиной для рассматри-

ваемой конструкции эжекционной горелки и значения Δp_g , что не дает возможности установления зависимости $[X] = f(\lambda_{pr})$. Специально созданное диагностическое устройство, упомянутое выше, устраняет это ограничение, сопутствующее испытаниям в условиях газовой плиты.

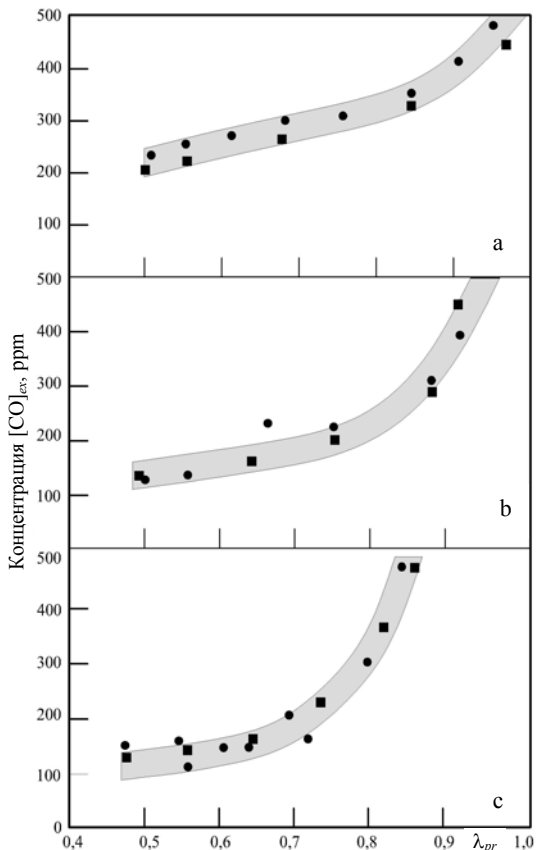


Рис. 2. Зависимость приведенной концентрации $[CO]_{ex}$ (при $[O_2] = 3\%$ в продуктах сгорания) от коэффициента избытка первичного воздуха при различных давлениях природного газа перед соплом, Па: а – 1000; б – 1500; в – 2000; ●, ■ – точки в различных сериях опытов

Fig. 2. The dependence of the reduced concentration of $[CO]_{ex}$ (when $[O_2] = 3\%$ in the combustion products) on the coefficient of primary air excess by varying the natural gas pressure ahead of the nozzle, Pa: а – 1000; б – 1500; в – 2000; ●, ■ – points in different test series

Все исследования, результаты которых представлены на рис. 2–5, проводились при работе горелки на природном газе в случае установки теплоприемной емкости диаметром 180 мм с нагревом воды в соответствии с ДСТУ 2204–93 [8].

Результаты стендовых исследований. На рис. 2, 3 представлены зависимости концентраций $[CO]$ и $[NO]$ в продуктах сгорания после их дожигания во вторичном воздухе ($\lambda_{\Sigma} > 1,0$) от коэффициента избытка первичного воздуха λ_{pr} при сжигании природного газа в горелке Whirlpool (США). Результаты получены при использовании стенда с верхним газо(дымо)собирающим колпаком путем пересчета по концентрациям данных фактических замеров о содержании вредных выбросов при $\lambda = \lambda_{\Sigma} > 1,0$ на состав смеси продуктов сгорания с $[O_2] = 3\%$: $X \equiv [CO]$, $[NO]$ и $[NO_2]$

$$[X]_{O_2=3\%} = [X]_{\lambda} \frac{21-3}{21-[O_2]_{\lambda}}, \quad (1)$$

где $[X]_{O_2=3\%}$, $[X]_{\lambda}$ – концентрация вредного компонента $[X]$ при $[O_2] = 3\%$ и фиксированном коэффициенте избытка воздуха λ_{Σ} соответственно; $[O_2]_{\lambda}$ – концентрация $[O_2]$ в продуктах сгорания при коэффициенте избытка воздуха λ .

Как следует из приведенных данных, характер зависимостей $[\text{NO}]$ и $[\text{CO}]$ от λ_{pr} противоположен друг другу: наблюдается монотонный рост $[\text{CO}]$ с увеличением λ_{pr} и понижение $[\text{NO}]$ при росте λ_{pr} . По этой причине оптимизация режимов по экологическим критериям затруднена. Для анализа полученных величин, прежде всего, сопоставим тенденции, найденные при оценке опытных данных, с изменением термодинамически равновесных концентраций под действием определяющих факторов.

Тенденции образования CO в условиях термодинамического равновесия. Оксид углерода CO – важнейший компонент в процессах горения углеводородов, являющийся основным реагентом в десятках реакций, формирующих любой из известных механизмов горения природного газа. Монооксид углерода – промежуточный и конечный компонент горения в ходе процесса выгорания топлива, а его концентрации варьируются на многие порядки в объеме факела в силу определяющей роли различных реакций на разных этапах горения. Такая ситуация следует из одновременного протекания химических реакций (кинетика), с одной стороны, процессов переноса импульса (движение), массы (перемешивание) и теплоты (температурный фактор) – с другой.

В соответствии с равновесной термодинамикой $[\text{CO}]_{eq}$ увеличивается при повышении температуры и уменьшении коэффициента избытка воздуха в условиях горения природного газа с воздухом. При этом в условиях перехода через стехиометрическое соотношение воздух : газ падение $[\text{CO}]_{eq}$ отмечается на порядки: с увеличением λ от 0,95 до 1,00 при температуре 1600 К – более чем на два порядка (с 1,146 до 0,018 % об.), а для λ от 1,00 до 1,05 – на порядок. С учетом сопутствующего росту избытка воздуха (область $\lambda > 1,0$) понижения температуры по мере увеличе-

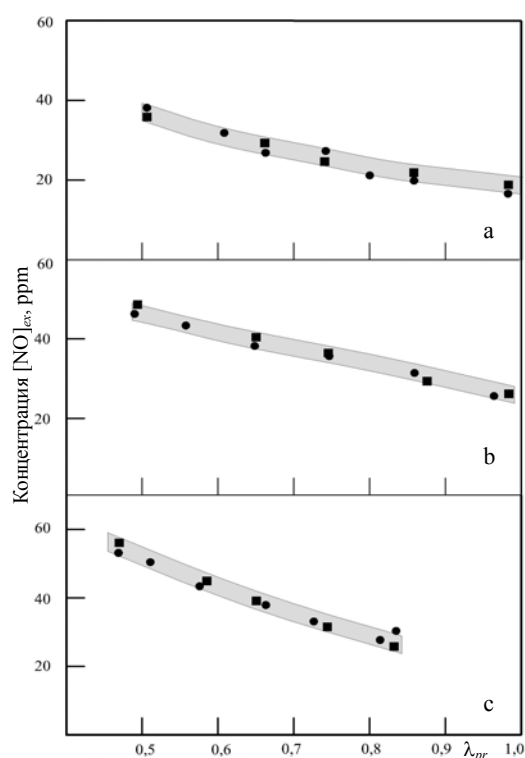


Рис. 3. Зависимость приведенной концентрации $[\text{NO}]_{ex}$ (при $[\text{O}_2] = 3\%$ в продуктах сгорания) от коэффициента избытка первичного воздуха при различных давлениях природного газа перед соплом, Па: а, б, в, •, ■ – то же, что на рис. 2
Fig. 3. The dependence of the reduced concentration of $[\text{NO}]_{ex}$ (when $[\text{O}_2] = 3\%$ in the combustion products) on the coefficient of primary air excess by varying the natural gas pressure ahead of the nozzle, Pa: a, b, c, •, ■ – same as in Fig. 2

ния избытка воздуха равновесное содержание $[\text{CO}]_{eq}$ в продуктах сгорания уменьшается еще сильнее.

Что касается NO, то равновесные концентрации этого токсичного компонента продуктов сгорания возрастают при увеличении λ и повышении температуры продуктов сгорания [9].

Сравнение реальных пламен с равновесными системами

• Образование CO при сжигании природного газа

Необычный, противоположный термодинамически равновесному распределению $[\text{CO}]_{eq}$ в зависимости от λ [9], характер изменения $[\text{CO}]_{ex} = [\text{CO}](\lambda_{pr})$ обусловлен комбинированным влиянием нескольких факторов. В частности, приведенный характер зависимости $[\text{CO}]$ от λ_{pr} (рис. 2) обусловлен тем, что значения $[\text{CO}]_{ex}$ определяются как первичным бунзеновским горением подготовленной смеси в конусах, так и дожиганием факелов (вторичное горение), и связан, в частности, с градиентами изменения λ ($d\lambda$) по длине пламени:

$$[\text{CO}]_{ex} = [\text{CO}](\lambda_{\Sigma}) = f \left\{ (\lambda_{pr}); \frac{d\lambda}{dl} \right\}; \quad (2)$$

$$\frac{d\lambda}{dl} \sim \frac{\lambda_{st} - \lambda_{pr}}{\Delta\lambda_{st}} \sim \frac{\lambda_{\Sigma} - \lambda_{pr}}{\Delta\lambda_{\Sigma}}, \quad (3)$$

где $\Delta\lambda_{st}$, $\Delta\lambda_{\Sigma}$ – расстояние от выхода первичной смеси из горелки до локализаций соответственно стехиометрической смеси и конечного состава продуктов сгорания после подмешивания вторичного воздуха и дожигания продуктов первичного горения.

Из этого следует существенная роль схемы взаимного расположения выходных отверстий горелочных устройств по отношению к нагреваемой поверхности (сосуду), формирующей аэродинамику потока продуктов сгорания. Эта схема определяет время пребывания реагирующих газов τ_{react} и, как следствие, меняет выходные концентрации компонент, в том числе $[\text{CO}]_{ex}$, по отношению к соответствующим равновесным значениям $[\text{CO}]_{eq}$.

Дополнительным фактором рассматриваемого влияния $\Delta\lambda_{pr}$ на $[\text{CO}]_{ex}$ является повышение температуры горения с увеличением λ_{pr} до 1,0, который сдвигает равновесие реакции $2\text{CO} + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{CO}_2$ при любом фиксированном λ в сторону CO.

Вместе с тем в реальных пламенах наблюдаются иные тенденции по сравнению с термодинамически равновесными системами, что может быть связано с кинетикой горения: при понижении температуры реагирующей смеси падает скорость химических реакций, равновесие в пламени не успевает наступить, и термодинамические тренды теряют силу.

Определенная неоднозначность влияния факторов на выход вредных веществ сказывается в том, что при выходе λ за пределы области стехиометрии возможность увеличения концентрации $[\text{CO}]$ при понижении ло-

кальных температур и неравновесности процесса дожигания образование CO возрастает в так называемой зоне риска образования CO [10].

С одной стороны, по данным [11], при повышении λ до 1,6 в условиях факела начинают нарастать [CO], и в области $\lambda \approx 1,60-1,75$ значение [CO] существенно увеличивается, а процесс горения приближается к срывному пределу. С другой – имеется информация о том, что при значениях коэффициента избытка воздуха порядка $\lambda = 2,0$ (избыток топлива $ER = 0,5$) и сухом воздухе концентрация [CO] в условиях подготовленных смесей очень низкая [10].

С увеличением коэффициента избытка воздуха ближе к области неустойчивого горения (повисание и отрыв) происходит увеличение выбросов CO в связи с пульсациями пламени при понижении его температуры. Догорание CO в этих условиях ослабляется из-за торможения кинетического механизма. При уменьшении коэффициента избытка воздуха (роста ER) выбросы CO определяются химическим равновесием (термодинамикой реакции) и повышаются с увеличением температуры.

Равновесная концентрация [CO] возрастает при уменьшении λ (росте ER) по отношению к случаю сжигания бедных смесей (в частности, в турбинах) и при соответствующем повышении температуры [11].

• Образование оксидов азота при сжигании природного газа

При анализе полученных данных по образованию оксидов азота следует иметь в виду двуступенчатый характер сжигания газа в атмосферных горелках, результаты которого рассматриваются в зависимости от λ_{pr} на первой стадии процесса. Поэтому отличие накопленных данных от термодинамически равновесных при оценке зависимостей [NO] и [NO₂] от коэффициента избытка воздуха и температуры может быть связано либо с термодинамикой догорания первичных факелов, либо с кинетикой каждой из стадий горения. Кроме того, большое значение имеют факторы неустойчивости горения и пульсации при протекании химической реакции.

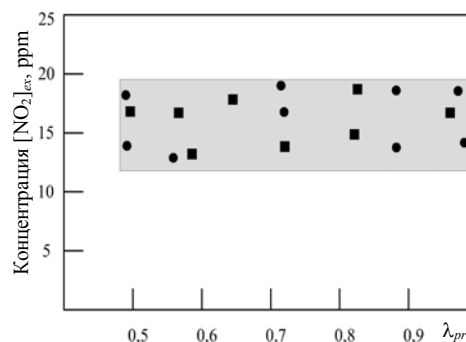
Обобщение данных по [NO₂] (рис. 4) показывает, что концентрация [NO₂] на выходе из дымового канала практически не зависит от коэффициента избытка первичного воздуха λ_{pr} , поступающего в горелку, а также от тепловой нагрузки горелки (давления газа).

Рис. 4. Зависимость приведенной концентрации [NO₂]_{ex} (при [O₂] = 3 % в продуктах сгорания) от коэффициента избытка первичного воздуха:

•, ■ – точки в различных сериях опытов

Fig. 4. The dependence of the reduced concentration of [NO₂]_{ex} (when [O₂] = 3 % in the combustion products) on the coefficient of primary air excess:

•, ■ – points by different test series



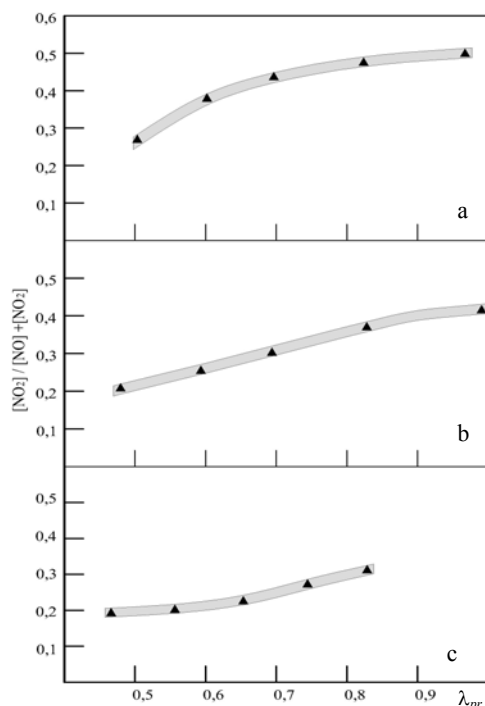


Рис. 5. Зависимость отношения концентрации $[\text{NO}_2]/([\text{NO}] + [\text{NO}_2])$ от коэффициента первичного избытка воздуха при различных давлениях природного газа перед соплом, Па: а – 1000; б – 1500; в – 2000

Fig. 5. Dependence of the concentration ratio $[\text{NO}_2]/([\text{NO}] + [\text{NO}_2])$ on the coefficient of the primary air excess various natural gas pressures in front of the nozzle, Pa: а – 1000; б – 1500; в – 2000

исследований влияния рабочих параметров процесса сжигания природного газа на уровень выбросов CO и NO_x. Выполнен комплекс расчетно-теоретических экспериментов и стендовых испытаний тестовых атмосферных горелок газовых плит в огневых условиях, направленный на оптимизацию экологических характеристик систем использования газа в коммунальном хозяйстве.

2. Установлено, что основными вредными веществами, присутствующими в выбросах газовых плит, являются оксиды углерода CO и азота NO и NO₂, причем концентрации [NO₂] обнаруживаются в соизмеримых с [NO] величинах. Такие выбросы создают опасный источник прямого контакта с человеком непосредственно в месте их образования.

3. При экспериментальных исследованиях системно изучено образование оксидов углерода CO и азота NO и NO₂ в зависимости от коэффициента избытка первичного воздуха λ_{pr} , поступающего в горелку. Установлены значения этого параметра, предпочтительные с экологической позиции, и выявлено противоположное влияние λ_{pr} на изменение концентраций

Вместе с тем доля NO₂ в общем выбросе оксидов азота при определенных режимных параметрах работы горелок может составлять до 50 %. На рис. 5 представлены значения соотношения концентраций выбросов $[\text{NO}_2]/([\text{NO}] + [\text{NO}_2])$ для испытуемой горелки. Из графиков видно, что доля NO₂ в выбросах оксидов азота увеличивается с ростом коэффициента избытка первичного воздуха λ_{pr} и незначительно уменьшается с понижением нагрузки на горелку. Это указывает на определяющую роль кинетических факторов в условиях неустойчивого горения ($\lambda_{pr} \rightarrow 1,0$).

ВЫВОДЫ

1. Выполнен комплекс исследований процесса сжигания газа в атмосферных горелках бытовых плит, направленный на изучение экологических аспектов использования топлива. Предложена оригинальная методология и разработан компьютеризованный огневой стенд для количественных

токсичных компонент продуктов сгорания ($[\text{CO}]_{ex}$ и $[\text{NO}]_{ex}$) на выходе из дымохода. Выбросы CO уменьшаются с увеличением нагрузки и возрастают с увеличением λ_{pr} . В диапазоне $\lambda_{pr} \approx 0,45-0,70$ значения концентрации [CO] не превышают норму по ДСТУ 2204–93 при давлениях газа 1000 и 1500 Па. Выбросы NO_x уменьшаются с увеличением нагрузки и ростом λ_{pr} ; максимальное значение (около 60 ppm) зафиксировано при давлении газа перед горелкой 2000 Па и $\lambda_{pr} \approx 0,45$.

4. Подтверждены недавно полученные данные (США) о значительном выходе NO_2 при сжигании газа, что представляет особую опасность для пользователей газовых плит [12]. Выбросы NO_2 детектировались при всех испытаниях. Концентрация $[\text{NO}_2]$ зафиксирована в диапазоне значений 15–20 ppm, независимо от давления газа перед соплом и коэффициента избытка первичного воздуха.

5. Представленные результаты исследований практически не анализировались и в литературе не рассматривались.

Условные обозначения:

$E\text{INO}_x$ – индекс выбросов NO_x , приведенный к 1 кг сжигаемого топлива; λ – коэффициент избытка воздуха; $[X]$ – объемная (молярная) концентрация компонента X в реагирующей смеси.

Индексы:

eq – для равновесного состава продуктов реакции; *ex* – на выходе из дымохода; *pr* – относительно к первичному избытку воздуха; *react* – для компонентов реакций (реакционной смеси); *st* – стехиометрический; Σ – для реакционной смеси в стадии дожигания и последующего воздушного разбавления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сорока, Б. С. Сучасний стан та напрями удосконалення пальників побутових газових плит. Ч. 1: Науково-технологічні засади ефективного використання палива та екологічно чистого спалювання газу в кухонних плитах / Б. С. Сорока, В. В. Горупа // Энерготехнологии и ресурсосбережение. 2017. № 3. С. 3–19.
2. Сорока, Б. С. Экологические характеристики современных систем бытового использования топлива. Ч. 1 / Б. С. Сорока, В. В. Горупа // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 4. С. 340–354. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-340-354>.
3. Сорока, Б. С. Эффективность использования газового топлива и окислительной смеси при их увлажнении / Б. С. Сорока, Н. В. Воробьев // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 6. С. 547–564. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-547-564>.
4. Гламаздин, П. М. Экологические аспекты модернизации водогрейных котлов большой мощности / П. М. Гламаздин, Д. П. Гламаздин, Ю. П. Ярмольчик // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 3. С. 249–259. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-3-249-259>.
5. Creamer, K. S. *Primary Aeration as a NO_x Control Strategy. Topical Report, January–December 1994* [Electronic resource] / K. S. Creamer, M. J. Grassi, P. George. // Osti.gov. 2005. Mode of access: <https://www.osti.gov/biblio/91537>.
6. Whag, H. The Effects of Primary Air Distribution on Emission from a Natural Gas Water Heater [Electronic Resource] / H. Whag. Marquette University, 2012. Mode of access: https://epublications.marquette.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1167&context=theses_open
7. Handbook for Evaluating Emissions and Costs of APUs and Alternative Systems / National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Washington, The National Academies Press, 2012. 244 p. <https://doi.org/10.17226/22797>.

8. Плити газові побутові. Загальні технічні умови: ДСТУ 2204–93. Київ: Держстандарт України, 1994. 43 с.
9. Продукты сгорания природного газа при высоких температурах: состав и термодинамические свойства / И. Н. Карп [и др.]. Киев: Техніка, 1967. 382 с.
10. Göke, S. Influence of Steam Dilution on NO_x Formation in Premixed Natural Gas and Hydrogen Flames / S. Göke, C. O. Paschereit // 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. 2012. <https://doi.org/10.2514/6.2012-1272>.
11. Backhaus, K.-H. Erdgas als Erfolgsfaktor zur Erreichung Europäischer Klimaziele [Electronic Resource] / K.-H. Backhaus // Haustechnik Dialog. 2013. Mode of access: <https://www.haustechnikdialog.de/News/15302/Erdgas-als-Erfolgsfaktor-zur-Erreichung-Europaeischer-Klimaziele-Aktuelle-Herausforderungen>.
12. Nicole, W. Cooking up Indoor Air Pollution / W. Nicole // Environmental Health Perspectives. 2014. Vol. 122, No 1. <https://doi.org/10.1289/ehp.122-A27>.

Поступила 03.12.2019 Подписана в печать 28.02.2020 Опубликована онлайн 30.09.2020

REFERENCES

1. Soroka B. S., Gorupa V. V. (2017) The Current State and Directions of Improvement of Burners for Household Gas Stoves. Part 1. Scientific and Technological Bases of Efficient Use of Fuel and Environmentally Friendly Gas Combustion in Kitchen Stoves. *Energotekhnologii i Resursosberezhenie = Energy Technologies and Resource Saving*, (3), 3–19 (in Ukrainian).
2. Soroka B. S., Horupa V. V. (2020) Environmental Characteristics of Modern Systems of Domestic Use of Fuel. Part 1. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (4), 340–354. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-340-354> (in Russian).
3. Soroka B. S., Vorobyov N. V. (2019) Efficiency of the Use of Humidified Gas Fuel and Oxidizing Mixture. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (6), 547–564. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-547-564> (in Russian).
4. Glamazdin P. M., Glamazdin D. P., Yarmolchick Yu. P. (2016) Environmental Aspects of Modernization of High Power Water-Heating Boilers. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 59 (3), 249–259. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-3-249-259> (in Russian).
5. Creamer K. S., Grassi M. J., George P. (1995) *Primary Aeration as a NO_x Control Strategy. Topical Report, January–December 1994*. Available at: <https://www.osti.gov/biblio/91537>.
6. Whag H. (2012) *The Effects of Primary Air Distribution on Emission from a Natural Gas Water Heater*. Marquette University. Available at: https://epublications.marquette.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1167&context=theses_open.
7. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2012) *Handbook for Evaluating Emissions and Costs of APUs and Alternative Systems*. Washington, The National Academies Press. 244. <https://doi.org/10.17226/22797>.
8. DSTU 2204–93 (State Standard of the Ukraine). *Gas Stoves for Household Use. General Technical Conditions*. Kiev, Derzhstandart Ukraini, 1994. 43 (in Ukrainian).
9. Karp I. N., Soroka B. S., Dashevskii L. N., Semernina D. (1967) *Natural Gas Combustion Products at High Temperatures: Composition and Thermodynamic Properties*. Kiev, Tekhnika Publ. 382 (in Russian).
10. Göke S., Paschereit C. O. (2012) Influence of Steam Dilution on NO_x Formation in Premixed Natural Gas and Hydrogen Flames. *50th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*. <https://doi.org/10.2514/6.2012-1272>.
11. Backhaus K.-H. (2013) Erdgas als Erfolgsfaktor zur Erreichung Europäischer Klimaziele. *Haustechnik Dialog*. Available at: <https://www.haustechnikdialog.de/News/15302/Erdgas-als-Erfolgsfaktor-zur-Erreichung-Europaeischer-Klimaziele-Aktuelle-Herausforderungen> (in German).
12. Nicole W. (2014) Cooking up Indoor Air Pollution. *Environmental Health Perspectives*, 122 (1). <https://doi.org/10.1289/ehp.122-A27>.

Received: 3 December 2019 Accepted: 28 February 2020 Published online: 30 September 2020