

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЖИГАНИЯ ГАЗОВ В ЗАМКНУТОМ КОЛЬЦЕВОМ ПЛАМЕНИ

Комина Г. П.

ENVIRONMENTAL CHARACTERISTICS OF COMBUSTION OF GASES IN A CLOSED RING FLAME

Komina G. P.

Аннотация

Введение: приведены результаты исследования газогорелочных устройств вихревого типа, без каких-либо реконструкций позволяющих сжигать как природные газы, так и биогазы. Экологические характеристики таких горелок недостаточно изучены, поэтому представляют интерес результаты исследования количества вредных примесей в продуктах сгорания газов, сжигаемых в вихревом потоке. **Цель исследования:** выявить геометрические размеры горелки и камеры горения для создания вихревых потоков обеспечивающих стабилизацию пламени при сжигании природного газа и биогаза. Определить интенсивность крутки для исследуемых вихревых горелок с внутренней стабилизацией пламени, в зависимости от геометрических характеристик газогорелочных устройств. Провести исследование полноты сгорания газов при минимальном количестве оксидов азота и бенз(а)пирена образующихся в продуктах сгорания. **Результаты:** Сравнительные анализы вредных компонентов в продуктах сгорания газа традиционного и кольцевого факелов показали, что экологическая характеристика у кольцевого пламени значительно выше, чем у традиционного. Содержание оксидов азота снижается в несколько раз, так как крутка потоков газа и воздуха позволяет получить однородную смесь, необходимую для сжигания газов без химического недожога, с минимальным количеством бенз(а)пирена и оксидов азота. Вихревое сжигание газов в кольцевом пламени позволяет одновременно использовать несколько способов снижения вредных веществ для снижения вредных компонентов в продуктах сгорания. **Практическая значимость:** получены оптимальные значения соотношения диаметра сопла и диаметра камеры, а также соотношение сечение входа и поперечного сечение тангенциального лопаточного завихрителя, при которых создается пламя в виде замкнутого объемного кольца типа «тора» с внутренней стабилизацией. Кольцевое пламя позволяет повысить экологическую эффективность газогорелочных устройств.

Ключевые слова: вихревое сжигание газов, газовая горелка, кольцевое пламя, экологическая безопасность.

Введение

В настоящее время большая часть газообразного топлива в отопительных котлах сжигается в вихревом потоке, поэтому представляют интерес результаты исследования по количеству вредных

Abstract

Introduction: The article presents the results of a study of vortex-type gas-burning devices, without any reconstructions that allow burning both natural gases and biogas. The ecological characteristics of such burners have not been sufficiently studied, and therefore the results of the study of the amount of harmful impurities in the combustion products of gases burned in the vortex flow are of interest. **The purpose of the study** is to reveal the geometrical dimensions of the burner and the combustion chamber to create vortex flows ensuring flame stabilization during the combustion of natural gas and biogas. The authors determine the twist intensity for the investigated vortex burners with internal flame stabilization, depending on the geometric characteristics of the gas burners and carry out a study of the completeness of combustion of gases with a minimum amount of nitrogen oxides and benz (a) pyrene produced in combustion products. **Results:** Comparative analyzes of harmful components in combustion products of traditional and ring torches have shown that the ecological characteristic of a ring flame is much higher than that of a traditional one. The content of nitrogen oxides decreases several times, since the twist of the gas and air flows makes it possible to obtain a homogeneous mixture necessary for burning gases without chemical undersoil, with a minimum amount of benzo (a) pyrene and nitrogen oxides. Vortex combustion of gases in a ring flame allows simultaneous use of several methods of reducing harmful substances in order to reduce harmful components in combustion products. **Practical significance:** the optimum values of the ratio of the nozzle diameter and the chamber diameter are obtained, as well as the ratio of the inlet cross section and the cross section of the tangential vortex swirler, at which a flame is created in the form of a closed volumetric ring of the “torus” type with internal stabilization. The authors emphasize that the ring flame allows to increase the ecological efficiency of gas burners.

Keywords: vortex combustion of gases, gas burner, ring flame, environmental safety.

примесей в продуктах сгорания газов в топочно-горелочных устройствах вихревого типа.

Для проведения исследований была выбрана вихревая горелка с внутренней стабилизацией пламени, а пламя имело вид замкнутого коль-

ца. Использовалась горелка конструкции инженера Тюкина К. К. [1, 6, 18]. Горелка (рис. 1) была установлена в стальной охлаждаемой топке (рис. 3). Испытания проводились на природном газе и биогазе птицефабрики. Рассмотрим устройство горелки. Особенность её оригинальной конструкции заключается в двухступенчатой подаче воздуха на горение. Проточная часть горелки расположена коаксиально в воздухораспределительном корпусе. Она состоит из тангенциального лопаточного завихрителя и выходного горелочного сопла. Корпус горелки оснащен тангенциальным входным патрубком для подачи воздуха и имеет, с одной стороны, плоскую торцевую стенку, а с другой — выходное окно. Сопло установлено в выходном окне корпуса с кольцевым зазором. На торцевой стенке корпуса по оси горелки помещен узел подачи газа с запальным устройством. Газ подается из газовой камеры через газовыпускные отверстия, расположенные на торцевой стенке проточной части. Первичный воздух поступает через завихритель сквозь ряд отверстий. Вторичный воздух поступает через кольцевой зазор. Конструкция горелки представлена на рис. 1, устройство проточной части горелки показано на рис. 2.

Для подачи газа из цилиндрической газовой камеры предусмотрены 18 отверстий диаметром 5 мм. Ввод первичного воздуха осуществляется через отверстия 2 (четыре ряда по шесть от-

верстий диаметром 7 мм). Подачу первичного воздуха можно изменять с помощью регулировочных винтов 3, перекрывая часть отверстий 2. Вторичный воздух поступает через кольцевой канал 5, величина которого может регулироваться поворотом заслонки 4. Изменение положения заслонки обязательно для подачи необходимого количества воздуха при изменении расхода газа или его состава. Горелка работает в автоматическом режиме, когда в вихревой камере устанавливается определенная структура потоков для создания кольцевого вихревого пламени. При определенном соотношении диаметра сопла к диаметру камеры всегда образуется зона осевого обратного потока по оси камеры. Этот поток поступает в топку через приосевую зону сопла [2, 16]. Осевой обратный поток ограничен по радиусу значением пульсационных составляющих характеристик вихревого потока. Для стабилизации пламени большое значение имеет рециркуляционная зона, которая создает рециркуляцию горячих продуктов сгорания в область, где скорость распространения пламени и скорость потока могут быть близки. При этом длина пламени и расстояние от горелки, на котором происходит стабилизация пламени, значительно сокращается. Высокий уровень турбулентных пульсаций в зоне воспламенения газа мгновенно создает множество микрообъемов с благоприятными температурными и скоростными характеристиками.

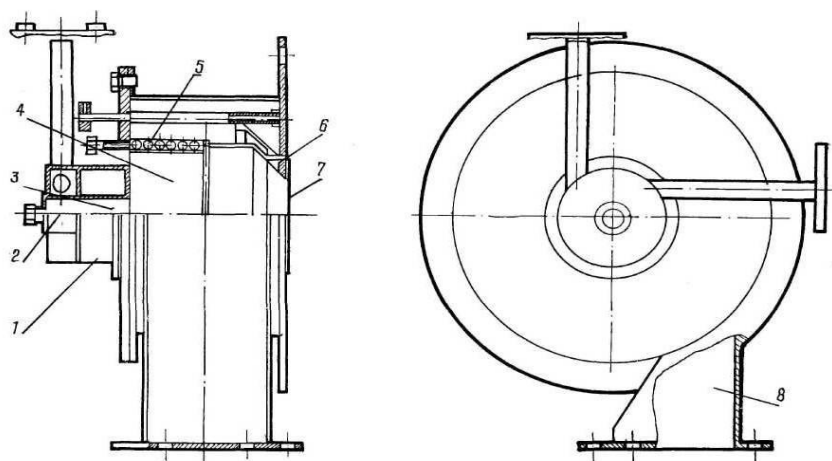


Рис. 1 Вихревая газовая горелка:

1 — проточная часть горелки; 2 — узел подачи газа; 3 — запальное устройство; 4 — завихритель; 5 — отверстия для подачи первичного воздуха; 6 — кольцевой зазор для подачи вторичного воздуха; 7 — сопло для выхода смеси газа с первичным воздухом; 8 — тангенциальный патрубок для подачи воздуха

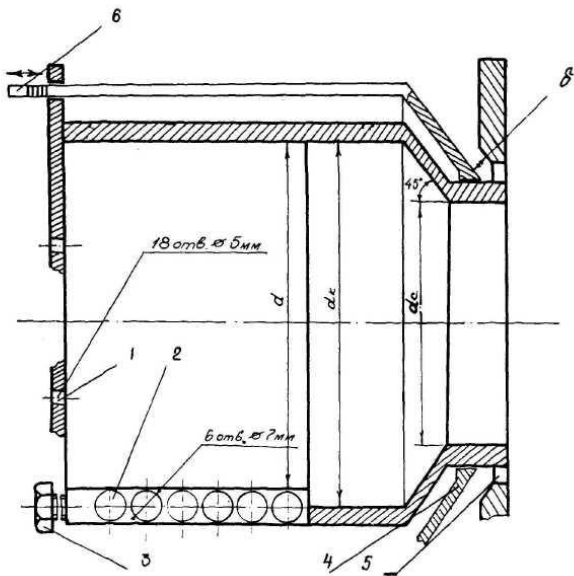


Рис. 2. Проточная часть горелки:

- 1 — 18 отверстий диаметром 5 мм для ввода газа; 2 — 6 отверстий диаметром 7 мм для подачи первичного воздуха; 3 — регулировочный винт (4 шт.); 4 — регулировочная заслонка вторичного воздуха; 5 — кольцевой канал вторичного воздуха; 6 — указатель перемещения заслонки

Таким образом, создается пламя в виде замкнутого объемного кольца типа «тора». Для практической реализации вихревой горелки с внутренней стабилизацией пламени данное условие должно быть конкретизировано. Прежде всего, геометрическое подобие обуславливает равенство значений геометрической характеристики, которая может быть записана в виде соотношений размеров проточной части:

$$S = \frac{d_c / d_k}{F_{\text{вх}} / F_k}, \quad (1)$$

где d_c и d_k — диаметр сопла и диаметр камеры соответственно, их отношение должно быть выше 0,2 (по теории Ляховского Д. Н.); $F_{\text{вх}}$ и F_k — суммарное сечение входа и поперечное сечение тангенциального лопаточного завихрителя соответственно.

В процессе эксплуатации, кроме равенства относительных геометрических характеристик, необходимо обеспечить охлаждение проточной части и компенсацию температурных расширений с учетом неравномерного нагрева отдельных элементов. Наилучшими характеристиками обладает сопло умеренной конусности ($25\text{--}30^\circ$ относительно оси камеры) и длины ($0,4\text{--}0,45 d_k$),

утопленное в воздухораспределительный корпус горелки, где оно интенсивно охлаждается закрученным потоком воздуха, истекающим через кольцевой зазор вторичного тракта вокруг сопла.

Суммарное температурное расширение проточной части компенсируется в этом же зазоре. В наилучших по охлаждению условиях находится лопаточный завихритель. Он состоит из лопаток, омываемых потоком первичного воздуха. Ширина щели между лопатками принимается в пределах $0,005\text{--}0,03$ м, во избежание деформаций фиксируется посредством установки профилированных лопаток с чередующимися в шахматном порядке воздушными каналами. Изогнутая в поперечном сечении форма лопатки предпочтительна, поскольку обеспечивает закрутку при минимальном наружном диаметре сборки проточной части. Число лопаток для обеспечения равномерности ввода воздуха в камеру должно быть не менее четырех. Длина лопаток и ширина щели между ними формируют входное сечение для первичного воздуха. Лопатки выполнены полыми с профилем поперечного сечения в виде сегмента. Полая лопатка имеет повышенный запас прочности и дополнительные возможности для охлаждения.

Длина камеры принята из условия $L_H / d_k = 0,8$. Цилиндрический корпус при тангенциальном подводящем патрубке вполне обеспечивает равномерное распределение потока по каналам цилиндрического тангенциального лопаточного завихрителя, о чем свидетельствует равенство давления во входном патрубке значениям статического давления во всех точках пространства корпуса.

Интенсивность крутки потока является важнейшим критерием вихревых горелочнотопочных устройств и зависит от значений скорости и статического давления. Интенсивность крутки для большинства вихревых устройств, в том числе для вихревой горелки с внутренней стабилизацией пламени, с некоторыми допущениями может оцениваться как геометрическая характеристика. Например, обратный осевой ток в камере зарождается при интенсивности крутки (геометрической характеристике) $S > 0,6$ [24]. Практические значения этой величины для вихревой горелки находятся в области $S \geq 6$. Устойчивость процесса горения может быть настолько велика,

что традиционные понятия об отрыве и проскоке пламени в диапазоне обычно применяемых значений давления газа и воздуха, теряют смысл [3, 16].

Методы исследования

Сжигались не взаимозаменяемые газы природный и биогаз [10, 12]. Такие исследования возможны, так как в устройстве принят вихревой принцип сжигания с высокой устойчивостью процесса горения в широком диапазоне регулирования нагрузки без отрыва факела и проскока его в горелку и двухступенчатая подача воздуха. Был проведен анализ продуктов сгорания на содержание оксида углерода, бенз(а)пирена и оксидов азота при сжигании двух видов газового топлива. Сначала следует привести новые требования по предельно допустимым выбросам (ПДК) по ГН 2.1.6.3492–17. В соответствии с разработанными значениями ПДК загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест максимально разовые: для оксида углерода равна $CO = 5 \text{ мг/м}^3$, углерода $C = 0,15 \text{ мг/м}^3$, оксида азота $NO = 0,4 \text{ мг/м}^3$, диоксида азота $NO_2 = 0,2 \text{ мг/м}^3$.

ПДК среднесуточная в мг/м^3 равна: для оксида углерода $CO = 3$, углерода $C = 0,05$, оксида азота $NO = 0,06$, диоксида азота $NO_2 = 0,04$, а бенз(а)пирена в мкг/100 м^3 — $C_{20}H_{12} = 1,10^{-6}$ [5, 13, 14].

При проведении испытаний учитывались атмосферные условия: измерялись температура

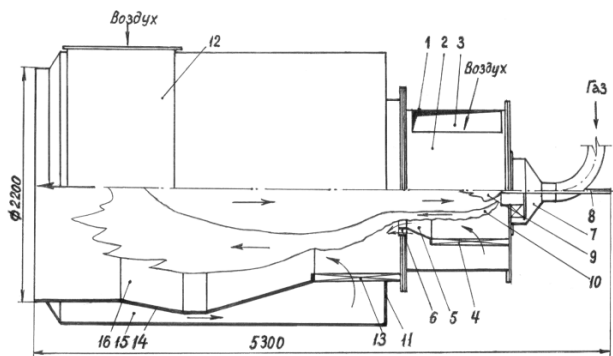


Рис. 3. Стальная охлаждаемая воздухом топка с вихревой газовой горелкой тепловой мощностью 15 Гкал/ч:

- 1 — камера горения, 2 — корпус, 3 — подвод воздуха на горение, 4 — завихритель первичного воздуха, 5 — сопло, 6 — кольцевой проход для вторичного воздуха, 7 — горелка газовая, 8 — узел розжига, 9 — запальный факел, 10 — основной факел, 11 — кожух смесителя, 12 — патрубок присадки воздуха на смешение, 13 — завихритель воздуха присадки, 14 — стенка камеры смешения, 15 — охлаждающая рубашка, 16 — камера смешения

(ртутным термометром), давление (барометром), относительная влажность (психрометром). Расход воздуха устанавливался по тарировочным характеристикам горелки, полученным предварительно. Отбор продуктов сгорания производился через две водоохлаждаемые газоотборные трубки со встроенными термопарами для замера температуры в точке отбора. Для оценки распределения температурных и концентрационных полей измерения ведут во взаимноперпендикулярных сечениях с перемещениями в продольном и поперечном направлении. Водоохлаждаемая газоотборная трубка устанавливается в пробоотборные лючки, расположенные на расстоянии 1,65; 6,33 и 7,9 калибров от среза горелки, входное отверстие со стороны цилиндрической поверхности направляется навстречу потоку продуктов сгорания. Температура продуктов сгорания измерялась одновременно с отбором проб посредством термопар ТПР и ХА в комплекте с потенциометром ПП-63.

Поля распределения температуры продуктов сгорания биогаза по радиусу и длине топки представлены на рис. 4. Форма температурных полей свидетельствует о вихревой структуре факела. Вблизи кратера горелки наблюдаются ярко выраженные пики значений температуры при относительном радиусе $r_i / r_n = 0,5$.

«Провалы» температуры по оси патрубка свидетельствуют о наличии зоны образования обратных токов и рециркуляции продуктов сгорания. При удалении от кратера горелки максимумы температур сдвигаются от оси, значения их уменьшаются, а следовательно, вихрь распадается. На расстоянии $L_\phi / d_c > 3$ для биогаза поля температур в основном выравниваются.

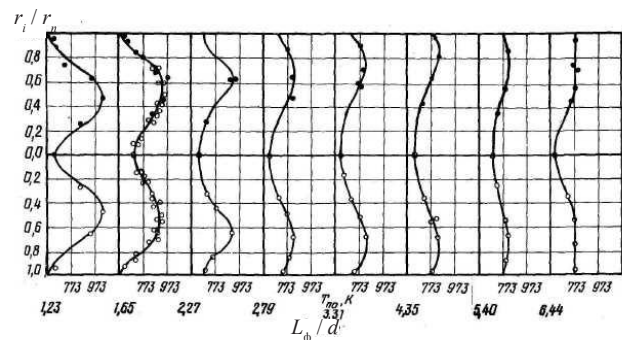


Рис. 4. Распределение температуры продуктов сгорания по радиусу и длине выхлопного топки

Замеренное в этих сечениях объемное содержание углекислого газа в продуктах сгорания достигает максимальных значений, т. е. можно сделать вывод о завершении процесса горения. Максимальные и минимальные нагрузки устанавливались при полном сгорании исследуемых газов при относительной длине факела $L_{\phi} / d_c = 2,5$ для природного газа и $L_{\phi} / d_c = 3,0$ для биогаза. Обычный подход к установлению предельных и номинальных нагрузок оказался непригодным, поскольку в диапазоне исследованных нагрузок от 0,01 до 0,25 МВт отрыва или проскока пламени не наблюдалось.

При максимальной мощности, равной 0,22 МВт, обеспечивалось полное сгорание газа при полном раскрытии всех отверстий для входа первичного воздуха. При уменьшении сечения отверстий для входа первичного воздуха $F_{вх}$ до $F_{вх} / F_k = 0,0277$ отмечалось снижение максимальной нагрузки до 0,20 МВт, на которой обеспечивается вихревая структура потока и заданная длина факела. Подача первичного воздуха при полном раскрытии $F_{вх}$ осуществляется мелкими струями в закрученный поток газа через 24 отверстия, вторичный воздух подается закрученным потоком через щель. До начала горения имеется участок для смешения первичного воздуха с газом. Гомогенная смесь получается за счет крутки потоков газа и воздуха и струйного смешения. Чем мельче дробление потока первичного воздуха, тем качественнее смешение и при больших нагрузках достигается полное сгорание для природного, и для биогаза.

Зависимости выхода оксида и диоксида азота от общего коэффициента избытка воздуха, полученные в результате экспериментов, приведены на рис. 5, а и б. Кривые 1 и 2 показывают зависимости выхода для БГ (2) и ПГ (1) при работе с неохлаждаемым стендом. Максимальный выход оксида азота достигает экстремального значения (109 мг/м³) при $\alpha = 1,25$ для ПГ и 64 мг/м³ при $\alpha = 1,3$ для БГ (т. е. для БГ на 41 % ниже, чем для ПГ). При работе на охлаждаемом стенде максимум выхода оксида азота снижается, становясь равным 50 мг/м³ для ПГ и 40 мг/м³ для БГ при работе на максимальных нагрузках. При уменьшении нагрузки до минимальной, равной 0,2–0,05 МВт, выход оксида азота еще более снижается, пик концентраций его смещается

к $\alpha = 1,12$. В этой точке для ПГ выход оксида азота составляет 22 мг/м³, для БГ 13 мг/м³, что на 36,8 % меньше. В пределах $\alpha_{общ} = 1,1–1,5$ при работе на биогазе выход оксида азота не превышает 65 мг/м³ на неохлаждаемом стенде, что свидетельствует о хороших экологических характеристиках при сжигании биогаза. В расчетах, полученных на основе математической модели [4, 11], содержание оксида азота в продуктах сгорания при сжигании БГ на 65 % ниже, чем для ПГ. В реальной установке это снижение составляет около 40 % на разных режимах работы.

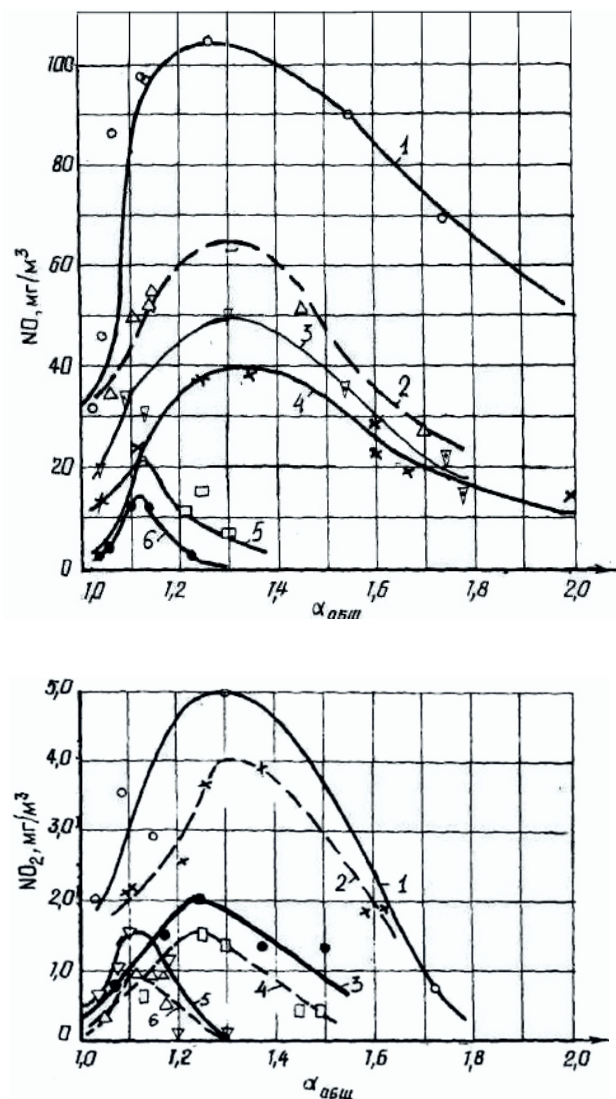


Рис. 5. Зависимость выхода оксидов азота от общего коэффициента избытка воздуха: а — NO; б — NO₂; 1 — ПГ, 2 — БГ — без охлаждения, максимальная нагрузка; 3 — ПГ, 4 — БГ — с охлаждением, максимальная нагрузка; 5 — ПГ, 6 — БГ — с охлаждением, минимальная нагрузка

Снижение выхода диоксида азота при сжигании природного газа, по сравнению с биогазом, не столь существенно, как для оксида азота, и составило 16,3 % на стенде без охлаждения, 23,8 % на стенде с охлаждением при максимальной нагрузке и 28 % при минимальной нагрузке. При оптимальных значениях коэффициента избытка первичного воздуха, равных $0,25 < \alpha < 0,75$, выход оксидов азота при работе на разных нагрузках не превышал 30 мг/м³ для природного газа и 17 мг/м³ для биогаза при изменении общего коэффициента избытка воздуха в пределах 1,02–1,05 и $> 1,35$. Такое количество оксидов азота на порядок меньше по сравнению с известными литературными данными и обеспечивается применением комплекса методов подавления NO_x: двухступенчатого подвода окислителя к зоне горения, рециркуляции продуктов сгорания за счет создания вихревой структуры пламени, качественного смешения газа и воздуха за счет струйной подачи воздуха, наличия водяных паров в составе биогаза.

Помимо оксидов азота экспериментально определялось содержание бенз(а)пирена в продуктах сгорания биогаза и природного газа. По результатам экспериментов построены графические зависимости содержания бенз(а)пирена при максимальной и минимальной нагрузках и изменении общего коэффициента избытка воздуха от 1,0 до 1,5, представленные на рис. 6. Уровень концентраций БП при работе на природном газе и максимальных нагрузках составил 23–36 нг/м³, на биогазе — 21–31. При работе на минимальных нагрузках концентрация БП составила 19–24 нг/м³ для ПГ и 16–21 нг/м³ для БГ. Таким образом, замечается незначительное снижение содержания БП в продуктах сгорания биогаза по сравнению с природным газом, несмотря смотря на большое количество балласта в биогазе, что должно приводить к увеличению выбросов Б(а)П. Это можно объяснить присутствием в Б(а)П водяных паров, которые подавляют образование БП.

Таким образом, имеется незначительное снижение содержания БП в продуктах сгорания биогаза по сравнению с природным газом.

Исследования продуктов сгорания турбулентной газовой горелки, разработанной в ЛИСИ для малометражных котлов мощностью от 20 до

95 кВт на природном газе, показали интересные результаты. Газ поступает в насадок горелки под углом 45° в закрученный поток воздуха. Воздух подается вентилятором, расположенным на одном валу с электродвигателем. Процесс горения протекает в насадке в кольцевом факеле. Схема горелки показана на рис. 7, а и б.

В первом варианте (рис. 7, а) газовый коллектор горелки выполнен из стальной трубы в виде кольца, в котором просверлены газовыпускные отверстия под углом 45°. Газ мелкими струями пронзает поток воздуха с периферии к центру. В этой горелке наблюдается устойчивое кольцевое пламя в пределах огневой части горелки.

Во втором варианте (рис. 7, б), когда газовый коллектор горелки был расположен в центре воздушного потока, газ подавался из центра к периферии. Кольцевой вид пламени был нарушен. Горение газа начиналось в огневой части горелки, а заканчивалось на расстоянии 0,5 м. Содержание оксидов азота в продуктах сгорания при одинаковом коэффициенте избытка воздуха и расходе газа изменялось в пределах 120–140 мг/м³ у первой горелки, а у второй — от 140 до 165 мг/м³ (при коэффициенте избытка воздуха 1,05–1,2). Содержание оксида углерода отличалось незначительно и изменялось у первой горелки от 0,002 % до следов, а у второй горелки — от 0,008 % до следов. Содержание бенз(а)пирена в первом варианте было 15–25 нг/м³, а во втором возросло до 35–47 нг/м³. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что сгорание газа в кольцевом факеле позволяет снизить содержание оксидов азо-

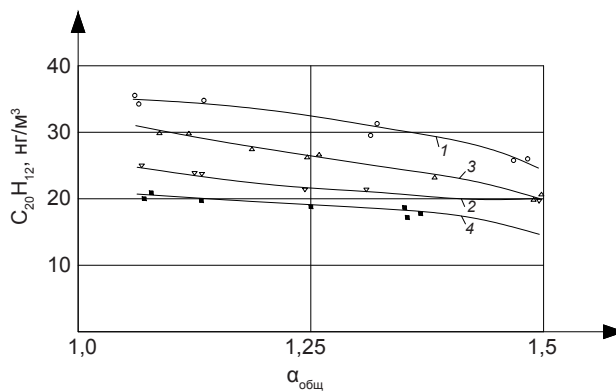


Рис. 6. Содержание бенз(а)пирена в продуктах сгорания в зависимости от α_{общ}

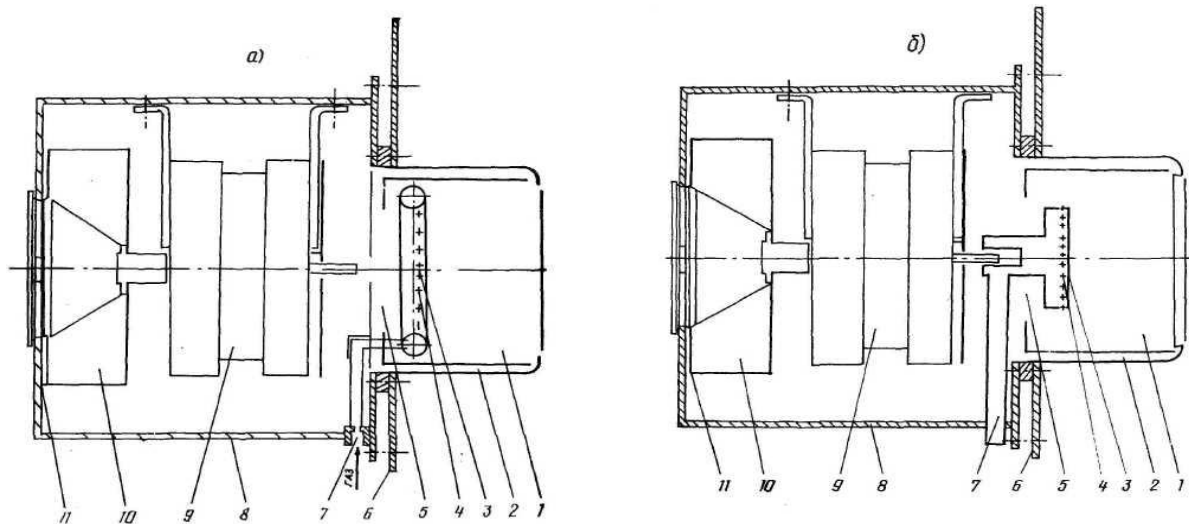


Рис. 7. Схема турбулентной газовой горелки (ЛИСИ) для малометражных котлов:
 а — первый вариант; б — второй вариант; 1 — огневая часть; 2 — воздушный зазор; 3 — газовый коллектор горелки;
 4 — газовыпускные отверстия; 5 — отверстия для подвода воздуха; 6 — подвод газа; 7 — фланец; 8 — корпус; 9 —
 электродвигатель; 10 — центробежный вентилятор; 11 — регулирующая заслонка

та в продуктах сгорания и не приводит при этом к увеличению содержания бенз(а)пирена.

Способы снижения вредных выбросов при сжигании биогаза и природного газа в закрученных потоках

Анализируя результаты исследований, можно сделать вывод, что сжигание газообразного топлива в вихревом кольцевом факеле со ступенчатым подводом воздуха приводит к снижению концентрации оксидов азота и минимальному количеству бенз(а)пирена. Горелки, в которых создается за счет закрученных потоков воздуха и газа кольцевое пламя, позволяют использовать сочетание нескольких методов подавления вредных выбросов при сжигании природного газа, биогаза и их смесей.

Рассмотрим способы снижения вредных выбросов при сжигании газа в кольцевых закрученных факелах. Исходя из данных, приведенных выше, можно использовать сочетание химических способов и конструктивных особенностей горелки. Конструкция горелки позволяет сжигать газ с двухступенчатым подводом воздуха. Экспериментальные и расчетные данные показали, что максимальное значение оксида азота достигается при $\alpha = 1,2-1,3$ [7, 17]. Ниже и выше этих значений α количество оксида азота уменьшается. В первом случае это объясняется ростом избыточной концентрации кислорода, а во вто-

ром случае (после достижения максимума NO) снижение концентрации объясняется снижением температуры факела, которая влияет в большей степени, чем избыток кислорода.

Известно, что двухступенчатый подвод воздуха снижает температуру в зоне факела, уменьшает скорость реакций, снижает содержание кислорода в ядре факела [9, 10]. В рассматриваемых вихревых газогорелочных устройствах коэффициент избытка первичного воздуха изменялся в пределах 0,2–0,75 при общем коэффициенте избытка воздуха 1,02–1,1. Концентрация NO_x не превышала 50 мг/м^3 . В прямоточной горелке типа ГШ содержание NO_x в продуктах сгорания природного газа было 120 мг/м^3 при той же производительности [8, 9]. В вихревых горелках сжигание газа происходит в факеле малой длины. Это приводит к созданию максимальных температур в сечении горелки. Однако результаты исследований авторов показали, что в кольцевом вихревом факеле содержание оксидов азота значительно сокращается. Объясняется это не только двухступенчатым подводом воздуха, но и наличием рециркуляции продуктов сгорания. В автоточном режиме работы горелки устанавливается определенная структура потоков. По оси камеры создается зона осевого обратного тока продуктов сгорания. Для создания кольцевого факела крутки должна быть в области $S > 6$.

Кроме того, вторичный воздух поступает через кольцевую щель с периферии кольца факела. Сжигание газа в кольцевом турбулентном факеле приводит к снижению уровня Б(а)П в два раза по сравнению с уровнем Б(а)П в турбулентном прямоточном факеле.

Выводы

Вихревое сжигание газов в кольцевом пламени позволяет одновременно использовать несколько способов снижения концентрации вредных веществ, что значительно уменьшает содержание оксидов азота при минимальном количестве бенз(а)пирена в продуктах сгорания. Для теплогенерирующих установок это очень важно, так как количество вредных компонентов меньше ПДК, что улучшает экологическую характеристику процесса горения.

Вихревое сжигание газов в кольцевом пламени не требует дополнительных устройств и затрат энергии для рециркуляции продуктов сгорания, впрыска пара или воды в зону горения, которые используются для снижения оксидов азота в продуктах сгорания. Продукты сгорания, содержащие оксиды азота образуют в городах кислые дожди, отрицательно влияют на окружающую среду, на растительность.

При использовании биогазов в теплогенерирующих установках для обеспечения устойчивого горения в широком диапазоне регулирования можно рекомендовать использование газогорелочных устройств, позволяющих сжигать топливо в вихревом кольцевом пламени. Большая проблема возникает при обезвреживании органических отходов и использовании газов, которые образуются в реакторах. Использование рассмотренных в статье газогорелочных устройств позволяет их сжигать и получать тепловую энергию, а продукты сгорания, поступающие в атмосферу экологически безопасны.

Литература

1. Тюкин, К. К. (2005). *Эффективность использования топлива в вихревых бесфутеровочных топках*. СПб.: Недра, 176 с.
2. Ляховский, Д. Н. (1958). Исследование аэродинамики циклонной камеры. В *Вопросы аэродинамики и теплопередачи в котельно-топочных процессах*. М.: Госэнергоиздат, сс. 114–150.
3. Хавкин, Ю. И. (1990). Методика расчета энергетических топочных камер. В *Рациональное использование газа в энергетических установках*. Л.: Недра, сс. 91–142.

4. Мариненко, Е. Е., Комина, Г. П. (1990). *Экологические аспекты использования биогаза в СССР и за рубежом*. М.: ВНИИЭгазпром, 45 с.

5. Главный государственный санитарный врач Российской Федерации (2017). Гигиенические нормативы ГН 2.1.6.3492-17. *Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений*.

6. Вербовецкий, Э. Х. (ред.). (2013). *Методические указания по проектированию топочных устройств энергетических котлов*. СПб.: ВТИ-АООТ «НПО ЦКТИ», 257 с.

7. Соболев, В. М. (2012). Современные технологические решения при разработке топочно-горелочных устройств. *Новости теплоснабжения*, № 10 (146), сс. 23–29.

8. Мариненко, Е. Е., Комина, Г. П. (2013). Снижение эмиссии парниковых газов в системах биоконверсии многокомпонентных органических отходов с получением биогаза. В *Юбилейный выпуск статей и публикаций к 55-летию кафедры Теплогазоснабжения и охраны воздушного бассейна*. СПб.: СПбГАСУ, сс. 99–104.

9. Худокормов, Н. Н. (2015). *Создание биосферосовместимых энергоэффективных технологий за счет применения интегрально (комплексного) подхода на объектах городского хозяйства (в котельных малой и средней мощности)*. Курск: Изд-во Курского института менеджмента, экономики и бизнеса, 259 с.

10. Комина, Г. П. (2005). Нетрадиционные ресурсы газообразного топлива и его использование. *Вестник гражданских инженеров*, № 3, сс. 67–72.

11. Комина, Г. П. (2007). Охрана атмосферы при сжигании газообразного топлива. *Газинформ*, № 9, сс. 8–14.

12. Комина, Г. П., Яковлев, В. А. (2016). Эффективные технологии сжигания неважнозаменимых газов. *Газинформ*, № 4 (54), сс. 54–60.

13. Минздрав России (2003). ГН 2.1.6.1338–03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест.

14. Государственный комитет Российской Федерации по охране окружающей среды (1999). Методика определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах производительностью менее 30 тонн пара в час или менее 20 Гкал в час, № 335/33–15.

15. Воликов, А. Н., Шаврин, В. И., Прохоров, С. Г. (2012). Энергоэкологическая эффективность природоохранных технологий и аппаратов при сжигании топлива (Часть 1). СПб.: СПбГАСУ, 168 с.

16. Худокормов, Н. Н., Комина, Г. П., Качанов, А. Н. (2015). Сжиганию природного газа — комплексный подход. *Берг коллегия*, № 3 (126), сс. 22–29.

17. Воликов, А. Н., Новиков, О. Н., Окатьев, А. Н. (2012). Энергоэкологическая эффективность сжигания газового и жидкого топлива в котлах малой и средней мощности. *Современные проблемы науки и образования*, № 4, с. 102.

18. Глебов, Г. А. (2012). Вихревое горелочное устройство. Классы МПК: F23D5/12. Детали, конструктивные элементы. Патент РФ № 2443941.

References

1. Tyukin, K. K. (2005). *Effektivnost' ispol'zovaniya topliva v vihrevykh besfuterovochnykh topkakh* [Efficiency of fuel use in

whirling bezfetrovorichnyh furnaces]. SPb.: Nedra, 176 p. (in Russian)

2. Lyahovskij, D. N. (1958). Issledovanie aehrodinamiki ciklonnoj kamery [Study of the aerodynamics of a cyclone chamber]. In *Voprosy aehrodinamiki i teploperedachi v kotel'no-topochnykh processah*. M.: Gosehnergoizdat, pp. 114–150. (in Russian).

3. Havkin, Yu. I. (1990). Metodika rascheta ehnergeticheskikh topochnykh kamer [Method for calculating energy combustion chambers]. In *Racional'noe ispol'zovanie gaza v ehnergeticheskikh ustanovkah*. L.: Nedra, pp. 91–142. (in Russian).

4. Marinenko, E. E., Komina, G. P. (1990). *Ekologicheskie aspekty ispol'zovaniya biogaza v SSSR i za rubezhom* [Ecological aspects of the use of biogas in the USSR and abroad]. M.: VNIIEgazprom, 45 p. (in Russian).

5. Glavnyj gosudarstvennyj sanitarnyj vrach Rossijskoj Federacii (2017). Gigienicheskie normativy GN 2.1.6.3492-17. Predel'no dopustimye koncentracii (PDK) zagryaznyayushchih veshchestv v atmosfernom vozduhe gorodskih i sel'skih poselenij [Hygienic standards of GN 2.1.6.3492-17. The maximum permissible concentration (MPC) of pollutants in the atmospheric air of urban and rural settlements]. (in Russian).

6. Verboveckij, E. H. (ed.). (2013). Metodicheskie ukazaniya po proektirovaniyu topochnykh ustrojstv ehnergeticheskikh kotlov [Methodical instructions for designing furnace equipment of power boilers]. SPb.: VTI-AOOT «NPO CKTI», 257 p. (in Russian).

7. Sobolev, V. M. (2012). Sovremennyye tekhnologicheskie resheniya pri razrabotke topochno-gorelochnykh ustrojstv [Modern technological solutions for the development of combustion and combustion devices]. *Novosti teplosnabzheniya*, № 10 (146), pp. 23–29. (in Russian).

8. Marinenko, E. E., Komina, G. P. (2013). Snizhenie ehmissii parnikovyykh gazov v sistemah biokonversii mnogokomponentnykh organicheskikh othodov s polucheniem biogaza [Reduction of greenhouse gas emissions in bioconversion systems of multi-component organic waste with production of biogas]. In *Yubilejnyj vypusk statej i publikacij k 55-letiyu kafedry Teplogazosnabzheniya i ohrany vozdušnogo bassejna*. SPb.: SPbGASU, pp. 99–104. (in Russian).

9. Hudokormov, N. N. (2015). *Sozdanie biosferosovmestimyyh ehnergoehffektivnykh tekhnologij za schet primeneniya integral'no (kompleksnogo) podhoda na ob'ektah gorodskogo hozyajstva (v kotel'nykh maloj i srednej moshchnosti)* [Creation of biosphere-compatible energy-efficient technologies through the application of an integrated (integrated) approach to urban facilities (in small and medium-power boiler houses)]. Kursk: Izd-vo Kurskogo instituta menezhmenta, ehkonomiki i biznesa, 259 p. (in Russian).

10. Komina, G. P. (2005). Netradicionnyye resursy gazoobraznogo topliva i ego ispol'zovanie [Unconventional

resources of gaseous fuels and their use]. *Vestnik grazhdanskih inzhenerov*, № 3, pp. 67–72.

11. Komina, G. P. (2007). Ohrana atmosfery pri szhiganii gazoobraznogo topliva [Protection of the atmosphere by burning gaseous fuels]. *Gazinform*, № 9, pp. 8–14. (in Russian).

12. Komina, G. P., Yakovlev, V. A. (2016). Effektivnyye tekhnologii szhiganiya nevzaimozamenyaemykh gazov *Gazinform*, № 4 (54), pp. 54–60. (in Russian).

13. Minzdrav Rossii (2003). GN 2.1.6.1338-03. *Predel'no dopustimye koncentracii (PDK) zagryaznyayushchih veshchestv v atmosfernom vozduhe naseleennykh mest* [Maximum permissible concentration (MPC) of pollutants in the atmospheric air of populated areas]. (in Russian).

14. Gosudarstvennyj komitet Rossijskoj Federacii po ohrane okruzhayushchej sredy (1999). *Metodika opredeleniya vybrosov zagryaznyayushchih veshchestv v atmosferu pri szhiganii topliva v kotlah proizvoditel'nost'yu menee 30 tonn para v chas ili menee 20 Gkal v chas* [Methodology for determining the emission of pollutants into the atmosphere when burning fuel in boilers with a capacity of less than 30 tons of steam per hour or less than 20 Gcal per hour] № 335/33–15. (in Russian).

15. Volikov, A. N., Shavrin, V. I., Prohorov, S. G. (2012). *Energoehkologicheskaya ehffektivnost' prirodohrannykh tekhnologij i apparatov pri szhiganii topliva (Chast' 1)* [Energy-Ecological Efficiency of Environmental Technologies and Apparatuses for Combustion of Fuel (Part 1)]. SPb.: SPbGASU, 168 p. (in Russian).

16. Hudokormov, N. N., Komina, G. P., Kachanov, A. N. (2015) *Szhiganiyu prirodnogo gaza — kompleksnyj podhod* [An integrated approach for combustion of natural gas]. *Berg kollegiya*, № 3 (126), pp. 22–29. (in Russian).

17. Volikov, A. N., Novikov, O. N., Okat'ev, A. N. (2012). *Energoehkologicheskaya ehffektivnost' szhiganiya gazovogo i zhidkogo topliva v kotlah maloj i srednej moshchnosti* [Energy-efficient combustion efficiency of gas and liquid fuel in boilers of small and medium power]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*, № 4, p. 102. (in Russian).

18. Glebov, G. A. (2012). *Vihrevoe gorelochnoe ustrojstvo. Klassy MPK: F23D5/12. Detali, konstruktivnyye ehlementy* [Vortex burner device. Classes IPC: F23D 5/12. Parts, structural members]. Patent RF № 2443941. (in Russian).

Автор

Комина Галина Павловна, канд. техн. наук

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

E-mail: kominagalina@mail.ru

Authors

Komina Galina Pavlovna, PhD. in Engineering

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

E-mail: kominagalina@mail.ru