

УДК 662.951.23

**ГАЗОВЫЕ ГОРЕЛКИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ СЖИГАНИЯ ГАЗА,  
ПОЛУЧАЕМОГО ИЗ БИОМАССЫ, И ГАЗООБРАЗНЫХ ОТХОДОВ  
GAS BURNERS USED FOR BURNING BIOMASS GAS  
AND GASEOUS WASTE**

П.А. Болбас, А.Д. Яковенко

Научный руководитель – Л.А. Тарасевич, к.т.н., доцент  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск  
P. Bolbas, A. Yakovenko

Supervisor – V. Tarasevich, Candidate of Technical Sciences, Docent  
Belarusian national technical university, Minsk

***Аннотация:** В статье рассмотрены новые типы горелок, используемые для сжигания газа.*

***Abstract:** The article discusses new types of burners used for gas combustion.*

***Ключевые слова:** Газовые горелки, биомассы, газообразные отходы, конусообразные горелки, радиальные горелки.*

***Key words:** Gas burn, biomass, gaseous waste, cone-shaped burners, radial burners.*

### **Введение**

Использование газовых горелок для сжигания природных (почвенных) газов очень распространено. Среди этих газовых горелок реже встречаются те, которые имеют конусообразный выходной канал (конус с сужением на выходе) для сжатия образующегося пламени. Это сужение полезно для ускорения воздушного потока в зоне впуска топлива. Это усиливает турбулентное перемешивание в корне пламени, усиливая горение. Тем не менее, это может повысить давление воздуха даже при небольшом сужении выходного канала. Это возможно, если интенсивность вихря пламени не снижается из-за потери инерции вращения потока у стенок выходного канала. Однако сужение выходного канала уменьшает диаметр зоны внутреннего выброса на оси вихря пламени и снижает приток горячих газов из топки. Это приводит к снижению надежности воспламенения и сгорания топлива. Сжигание синтетических газов, полученных в результате газификации биомассы или других газов с низкой калорийностью, усугубляет проблему.

### **Основная часть**

Анализ схем горелок и возможных режимов эффективного сжигания газа. Практика показывает, что газовые горелки с конусообразными выходными каналами в некоторых случаях очень эффективны для подавления выбросов оксида азота ( $NO_x$ ). Лучшие из этих газовых горелок продемонстрировали окончательный компромисс между экологическими характеристиками и эффективностью сжигания различных видов топлива. Компромисс основан на тщательном понимании процессов, которые развиваются в вихре пламени при создании различных уровней дефицита кислорода в отдельных зонах горения. Это требует адекватного понимания турбулентного массообмена в сильно закрученных потоках. Например, горелки некоторых газовых турбин “Сименс”,

которые уже давно представлены на рынке, реализуют сложную схему, которая подразумевает последовательные технологические операции сжигания почвенного газа с различными концентрациями  $O_2$  в пламени. В некоторых случаях они показали самый низкий возможный уровень концентраций  $NO_x$  вне турбины ( $15-16 \text{ мг/м}^3$ ) при концентрации  $CO$  в газах сгорания не более  $5-10 \text{ мг/м}^3$  (эти данные, очевидно, относятся к реальным концентрациям  $O_2$  в выхлопных газах этих турбин).

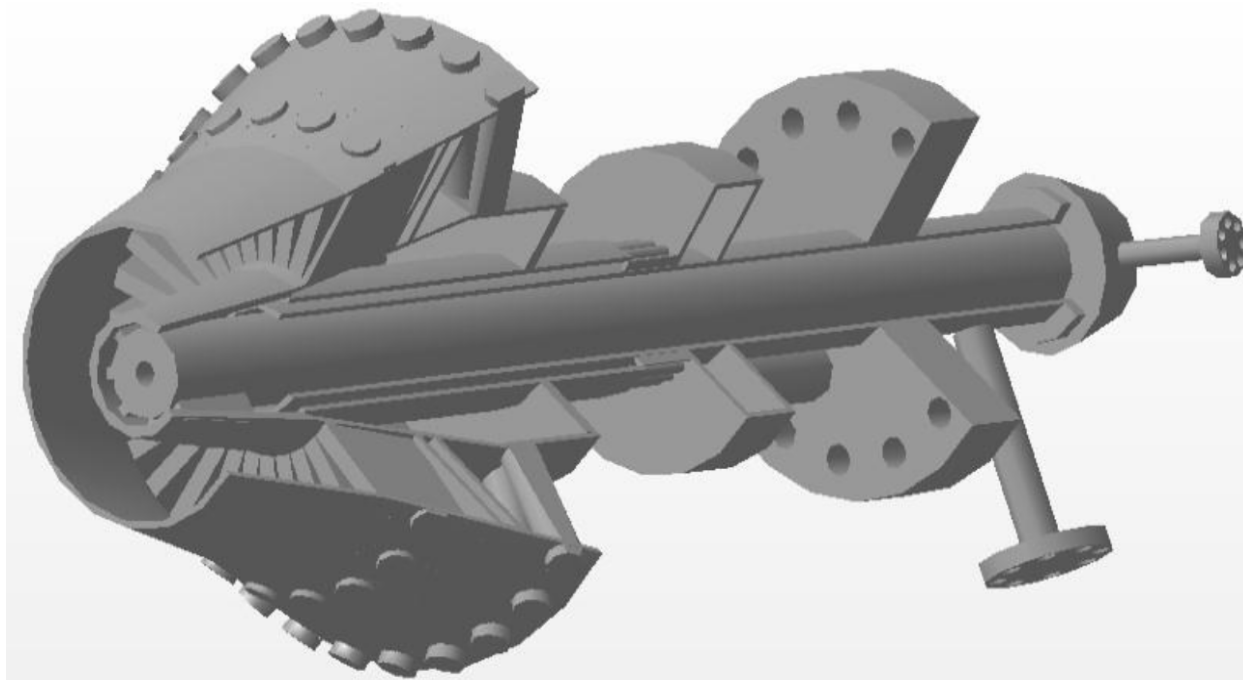


Рисунок 1 – Упрощенная схема горелки газовых турбин "Сименс", используемой для эффективного и экологически безопасного сжигания почвенного газа

Достижения этой схемы предположительно связаны с внедрением последовательных методов формирования вихрей пламени. Топливо сгорает по мере развития вихря на разных стадиях с контролируемым дефицитом кислорода и повышенными концентрациями  $CO$  и  $H_2$ . Это управление осуществляется во всем объеме вихря пламени. Различные уровни дефицита кислорода поддерживаются в его зонах и в концентрации промежуточных продуктов сгорания, расположенных в горелках, камерах вне их и даже в канале между лопатками (в проточном канале) ранних ступеней газовой турбины. Хотя тщательный анализ такой схемы сильно затруднен, мы считаем, что ее не следует сводить к контролю диффузии и кинетического горения. Его также не следует сводить к основным схемам двух- и трехступенчатого сгорания. Наиболее адекватный способ взглянуть на эту схему сжигания газа - рассматривать ее как последовательные стадии горения с различным уровнем кислорода недостаток и восполнить его процессами, развивающимися в потоке продуктов сгорания в каналах между лопатками ранних ступеней турбины. Большое количество воздуха, образующегося при охлаждении лопастей, поступает в газовый поток между лопастями. По понятным причинам мы не располагаем данными о расходе охлаждающего воздушного потока лопастей и его соотношении с расходом воздуха, который поступает в различные каналы горелки. Мы предполагаем, что

полное сгорание газов CO и H<sub>2</sub> может завершиться не только в камерах снаружи турбины, но и в каналах между лопатками ранних ступеней турбины. Большую роль в такой технологии играют реакции восстановления NO<sub>x</sub> в молекулярный азот (N<sub>2</sub>), которые развиваются в чередующихся зонах потока с различной стехиометрией, которые сначала характерны для вихрей пламени горелок, а затем, в потоке, - для ранних стадий турбины. Именно здесь завершаются реакции восстановления NO<sub>x</sub> и заканчивается сжигание CO и H<sub>2</sub>. Завершение сгорания может произойти при более высоких, но не экстремальных температурах, повышая тепловую эффективность и мощность турбины. В этом случае может быть реализовано оптимальное сочетание подавления выбросов NO<sub>x</sub> и полного сгорания топлива и промежуточных продуктов сгорания. Гипотеза о дополнительном снижении содержания NO<sub>x</sub> в проточном канале турбины соответствует данным, приведенным в работах проф. П. Рослякова [1]. Эти данные свидетельствуют о том, что сжигание топлива сводит к минимуму образование так называемых “термических” и “быстрых” NO<sub>x</sub>, особенно если процесс развивается чуть ниже стехиометрии. В этом случае влияние температуры горения на образование NO<sub>x</sub> значительно уменьшается. Полное сгорание CO и H<sub>2</sub> между лопатками турбины произойдет одновременно с дополнительным уменьшением NO<sub>x</sub>, которые образовались ранее, а также тех NO<sub>x</sub>, которые образуются в процессе сгорания CO и H<sub>2</sub>.

Технология радиальной струйной продувки. Газовые горелки с конусообразными выходными каналами, которые имеют более упрощенные схемы (рисунок 2), используются в котлах ПК-47 одной из российских электростанций и показывают отличные результаты. После 1982 года некоторые горелки были реконструированы в соответствии с новым проектом. До этого инженеры установили горелки с коническими выходами, которые были разработаны Центральным институтом котлов и турбин в шахматном расположении по бокам камер сгорания. Горелки имели тепловую мощность около 70-73 МВт, что должно было повысить температурное напряжение и температуру горения в их длинных вихрях пламени. Это, в свою очередь, должно было увеличить выбросы NO<sub>x</sub>. Эксплуатация этих горелок с шахматным расположением показала противоположные результаты. Эти горелки позже были усовершенствованы с минимальными изменениями в конструкции. Конструкция была основана на результатах исследования нового метода управления интенсивностью вихря пламени и структурой интенсивно закрученных потоков (вихрей) [2]. Это доказало уникальный потенциал стабилизации воспламенения и управления горением топлива в вихрях пламени. В то же время ряд горелок доказал возможность управления интенсивностью вихрей пламени. Новая технология более надежна и менее затратна, чем установка распределителя выходного потока, даже слегка скрученного. На это не влияет конструкция оборудования или закручивания воздушного потока в горелках или потока в центральной зоне – на оси вихря.

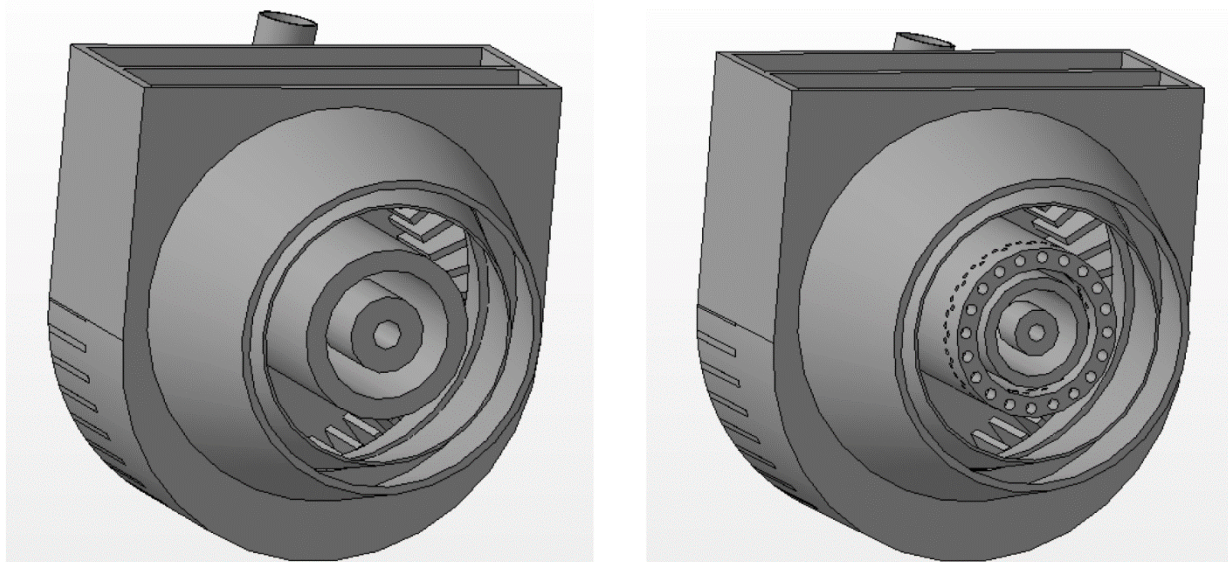


Рисунок 2 – Упрощенные схемы горелок котлов ПК 47

Благодаря этим переработанным горелкам (рисунок 2) после 1983 года концентрация  $\text{NO}_x$  за пределами топки снизилась до 100-120 мг/м<sup>3</sup> при сжигании почвенных газов. Концентрация  $\text{CO}$  была снижена до 20-30 мг/м<sup>3</sup>. Концентрация  $\text{NO}_x$  дополнительно снизилась в два-три раза, когда котлы ПК-47 снизили нагрузку. Одной из уникальных особенностей этих схем, используемых в котлах ПК-47, было создание восстановительной атмосферы, которая заполняла почти весь объем топки с различным уровнем дефицита кислорода в разных зонах камеры. В то же время вторичная циркуляция газа в камере и поступающий через стенки воздух обеспечивали полное и свободное от сажи сгорание восстановительной атмосферы. При постоянной нагрузке содержание кислорода в газовых трубах, вне пароперегревателей, составляло не более 0,3-0,4 процента от общего объема.

### **Заключение**

Описываемые горелки могут облегчить проблему полного сжигания смол вместе с газами в искривленном пламени на небольших энергетических установках мощностью 0,2-10 МВт. Первая попытка сжигания некоторых газов в прототипах этих горелок показала, что они способны практически полностью сжигать углеводороды. Экспериментально доказано, что можно сжигать синтетические газы в длинном пламени при температуре ниже 1000 °С или сжигать аэрозольные частицы смолы, генерируемые газом, или их пары вместе с ними без заметного повышения температуры горения.

### **Литература**

1. Яковлев, Б. В. Повышение эффективности систем теплофикации и теплоснабжения / Б. В. Яковлев. – М. : Новости теплоснабжения, 2008. – 488 с.
2. Лисиенко, В. Г. Топливо. Рациональное сжигание, управление и технологическое использование: в 3 т. / В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, М. Г. Ладыгичев. – М. : Теплотехник, 2003. – Т. 2. – 221 с.