

## Сжигание газа на огневом стенде инжекционной горелкой с кольцевым инжектором

**Пикашов В.С.<sup>1</sup>, Великодний В.А.<sup>1</sup>, Осиевский В.А.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Институт газа НАН Украины, Киев

<sup>2</sup> ДП «Укрметртестстандарт», Киев

Приведены результаты исследований инжекционной горелки с кольцевым инжектором на огневом стенде (печи). Сравнивалась работа горелок с кольцевым и известным инжекторами. Предложенная конструкция горелки позволяет снизить выбросы оксидов азота, значительно снизить температуру рассекателя, на несколько порядков уменьшить шум. Горелка предназначена в основном для реализации режима косвенного радиационно-конвективного теплообмена, но может также успешно работать в режиме равномерно распределенного теплообмена.

**Ключевые слова:** газовая горелка, кольцевой инжектор.

Наведено результати досліджень інжекційної пальника з кільцевим інжектором на вогняному стенді (печі). Порівнювалася робота пальника з кільцевим та відомим інжекторами. Запропонована конструкція пальника дозволяє знизити викиди оксидів азоту, значно знизити температуру розсікача, на декілька порядків зменшити шум. Пальник призначено в основному для реалізації режиму непрямого радіаційно-конвективного теплообміну, але може також успішно працювати в режимі рівномірно розподіленого теплообміну.

**Ключові слова:** газовий пальник, кільцевий інжектор.

Пламенные печи в различных отраслях промышленности работают в трех режимах радиационного теплообмена: прямого направленного, равномерно распределенного и косвенного направленного [1]. Глинков М.А. считал, что основная передача теплоты в высокотемпературных печах происходит преимущественно за счет радиации. Позже было установлено, что конвективная составляющая также играет существенную роль в передаче теплоты прямо или косвенно к нагреваемым поверхностям, и режимы теплообмена более правильно называть радиационно-конвективными [2]. Для реализации каждого из режимов требуются определенные способы сжигания газа и соответственно конструкции горелок.

В данной работе рассмотрены результаты исследований на огневом стенде нового способа сжигания газа горелкой с новым типом инжектора — кольцевым инжектором. Необходимость создания нового способа сжигания газа возникла в связи с тем, что известный способ и инжекционные горелки, реализующие его, как показала практика их использования, имеют такие недостатки: сложную конструкцию; большой шум; узкие пределы регулирования из-за проскока пламени, особенно при сжигании водородсодержащих газов; повышенные выбросы оксидов азота [3–5]. Холодные испытания ма-

кета горелки при продуве компрессорным воздухом и газом, изложенные в [6], показали пути использования кольцевого инжектора для создания нового типа горелки.

Цель настоящей работы — на огневом стенде (печи) показать, что горелка с кольцевым инжектором устраняет вышеперечисленные недостатки известных горелок и ее можно использовать для реализации косвенного направленного радиационно-конвективного теплообмена, а также в некоторых случаях и равномерно распределенного теплообмена.

Идея работы горелки с кольцевым инжектором заключается в том, чтобы создать неравномерные поля скоростей и концентраций топливного газа и воздуха на выходе из кольцевой щели между рассекателем и раструбом. Вследствие продувки горелки природным газом при расстоянии сопла от носика рассекателя  $S = 10$  мм получена значительная неравномерность этих полей по ширине щели  $X$  (рис.1). Для цилиндрического инжектора, то есть при  $S = 500$  мм, как и следовало ожидать, поля концентраций и скоростей топливного газа по ширине щели имеют постоянные значения.

Огневые испытания способа и горелки проводили на стенде в виде туннельной печи, имеющей в поперечном сечении изнутри длину 2000 мм, ширину 1100 мм и высоту 1000 мм

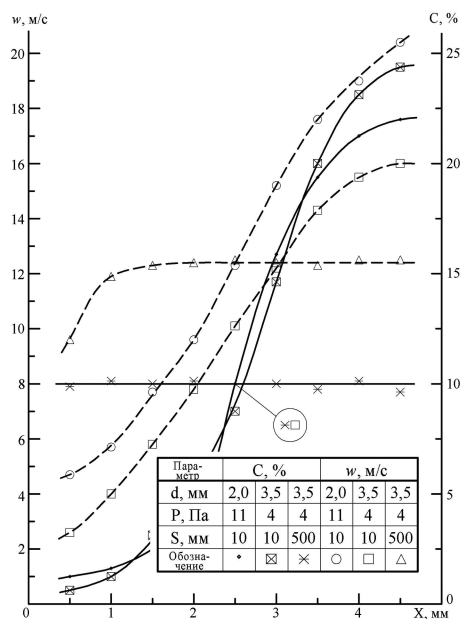


Рис.1. Эпюры концентраций природного газа в воздухе и скоростей потока при разной ширине щели X.

(рис.2). Внутренняя кладка печи выполнена из шамота 1, наружная стенка — из теплоизоляционного кирпича (пеношамота) 2. На расстоянии около 2000 мм от торцевой стенки туннеля установлена перегородка 3 из шамотных кирпичей, сложенных с разбежкой и образующих при этом отверстия для выхода дымовых газов. На полу камеры по всей ее площади расположен водяной калориметр 4, который изготовлен из труб прямоугольного сечения, подключенных между собой последовательно по ходу воды. Сверху калориметр покрыт теплоизоляцией толщиной 65 мм из плотного шамотного кирпича 5. Для измерения разности температур воды, протекающей через калориметр, использовали

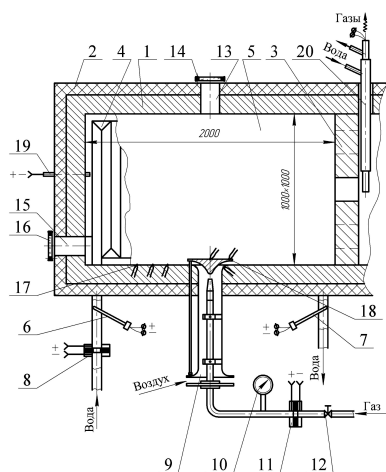


Рис.2. Схема огневого стенда для испытаний способа стадийного сжигания природного газа.

термометры сопротивления типа ТСМ-5071, которые введены внутрь до контакта с водой на входном и выходном патрубках 6 и 7. Термометры подключали к автоматическому пишущему мосту КСМ-4. Расход воды на калориметр определяли диафрагмой 8, разность давлений на выходе из которой измеряли дифманометром ДТ-50.

Исследуемая горелка 9 была установлена посредине боковой стены камеры. В различных опытах горелка занимала одно из двух положений. При первом, основном, предназначенном для реализации режима косвенного направленного теплообмена, раструб горелки находился заподлицо с кладкой. При втором положении раструб располагали на расстоянии 75–100 мм от поверхности кладки. Горелка при этом работала в режиме равномерно распределенного теплообмена. Давление газа перед горелкой  $P_G$  измеряли манометром 10 типа ОБМ1-160, кл. 1,5 с пределами измерений 0–0,3 МПа. Расход газа  $G_G$  определяли диафрагмой 11, подключенной к дифманометру ДТ-50. Погрешность измерений расхода газа  $\pm 1,5\%$ . Количество газа, поступающего на горение, регулировали игольчатым вентилем 12.

Для визуального наблюдения за процессом горения, а также для измерения температуры внутренней поверхности кладки оптическим пирометром «Проминь» напротив горелки расположено смотровое окно 13, которое закрыто заслонкой со стеклом 14. Такое же окно 15 с заслонкой 16 было в торцевой стенке. Последняя впритык примыкала к боковой стене, и ее ось по высоте располагалась на уровне оси горелки. По измеренным температурам в различных доступных точках кладки вычисляли среднее значение  $t_{кл}$ . Температуру поверхности кладки  $t_{кл}'$ ,  $t_{кл}''$ ,  $t_{кл}'''$  на расстоянии соответственно 100, 500 и 900 мм от оси горелки измеряли термопарами 17 типа ХА диаметром провода 1,5 мм с расположенными заподлицо с кладкой спаями. Спаи термопар 18 типа ХА диаметром 0,5 мм зачеканены в рассекатель в центре его наружной стороны и с краю. Измеряемые ими температуры —  $t_{pc}'$  и  $t_{pc}''$ . Спай третьей такой же термопары был зачеканен в раструб, измеряемая температура  $t_{pc}$ . Подключены все термопары к самопишущему потенциометру КСП-4.

Для контроля разрежения в камере через торцевую стену внутрь камеры введены импульсные трубки 19: одна на 25 мм выше уровня теплоизоляции калориметра, другая (на рис.2 не показана) на 100 мм ниже замка свода. Подсоединяли трубки к микроманометру ММН. Температуру отходящих из камеры газов  $t_g$  измеряли отсасывающей термопарой типа ПР30/6 с керамическим чехлом специальной конструк-

## Режимы косвенного направленного и равномерно распределенного теплообмена

S, мм	Температура, °C						NO <sub>x</sub> , мг/м <sup>3</sup>	NO + NO <sub>x</sub> , мг/м <sup>3</sup>
	t <sub>кл</sub> '	t <sub>кл</sub> ''	t <sub>кл</sub> '''	t <sub>рс</sub> '	t <sub>рс</sub> ''	t <sub>рт</sub>		
При d = 2 мм; S = 8 мм; P <sub>r</sub> = 0,15 МПа; V <sub>r</sub> = 6,2 нм <sup>3</sup> /ч*								
10	241/805	920/872	906/852	343/353	289/343	150/350	16/17	20/20
20	246/806	918/872	906/850	345/356	306/356	152/348	16/18	–
30	245/805	905/870	908/854	342/355	333/356	150/348	18/20	–
40	253/808	912/869	905/855	344/355	318/355	155/352	23/23	–
50	261/812	907/863	906/858	352/356	347/360	165/411	26/26	30/30
75	295/809	910/864	907/857	418/407	408/412	220/457	55/58	–
100	312/815	906/850	905/849	433/488	401/490	227/495	68/69	–
150	402/814	903/840	905/846	650/620	652/615	243/632	70/75	–
350	812/808	908/838	906/838	508/550	492/540	341/530	82/93	–
500	809/811	905/836	905/834	511/532	490/528	342/525	82/94	100/100
При d = 2,5 мм; S = 13 мм; P <sub>r</sub> = 0,245 МПа; V <sub>r</sub> = 13,3 нм <sup>3</sup> /ч**								
10	267/880	994/972	990/965	504/440	508/444	237/490	23/25	30/30
20	265/922	994/971	980/963	504/440	507/443	238/492	23/26	–
30	266/932	992/973	950/963	504/441	508/441	243/494	23/25	–
40	266/933	993/974	965/966	506/442	506/445	244/492	24/27	–
50	269/948	990/980	982/968	506/453	507/458	254/499	28/29	35/35
75	273/945	991/979	989/965	542/487	540/486	300/515	58/62	–
100	318/950	993/983	994/970	654/496	563/495	343/525	72/75	–
150	490/952	995/982	994/966	720/536	730/539	390/561	96/98	–
350	932/952	989/983	993/966	750/590	770/588	392/571	103/107	–
500	934/952	990/983	991/966	756/589	780/588	391/570	103/107	115/120
При d = 3,3 мм; S = 22 мм; P <sub>r</sub> = 0,15 МПа; V <sub>r</sub> = 16,9 нм <sup>3</sup> /ч***								
10	320	1068	1060	591	593	353	28	35
20	322	1069	1060	593	596	358	28	–
30	325	1067	1059	593	596	367	28	–
40	327	1069	1062	598	604	372	32	–
50	352	1065	1062	601	607	383	39	45
75	432	1066	1063	610	612	396	64	–
100	542	1062	1061	690	692	428	85	–
150	637	1061	1061	777	779	461	99	–
350	1012	1062	1062	850	856	469	117	–
500	1011	1061	1061	850	857	472	118	130

*Примечание.* В числителе – косвенный направленный теплообмен, в знаменателе – равномерно распределенный. \* Для всех случаев в числителе t<sub>кл</sub> = 850 °C, t<sub>r</sub> = 1022 °C, в знаменателе – 830 °C и 1092 °C; \*\* в числителе t<sub>кл</sub> = 970 °C, t<sub>r</sub> = 1132 °C, в знаменателе – 950 °C и 1160 °C; \*\*\* t<sub>кл</sub> = 1040 °C, t<sub>r</sub> = 1245 °C.

ции, вмонтированным в несущую водоохлаждаемую металлическую трубку 20. Эта же трубка служила для отбора газов на химический анализ. Трубку располагали таким образом, чтобы ее входное отверстие находилось напротив одного из окон в центре перегородки 21.

В огневых исследованиях на стенде сжигали природный газ из городской сети под давлением до 0,3 МПа. Анализ продуктов сгорания на O<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub> проводили на химическом газоанализаторе ГХЛ-1, на CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> и другой недожог – хроматографом «Газохром 3101», на NO – автоматическим самопишущим прибором

344-ХЛ-04. В каждом опыте выполняли анализ продуктов сгорания и по ним рассчитывали и регулировали коэффициент избытка воздуха, который поддерживали равным 1,03–1,06 с помощью заслонки на тыльной стороне горелки.

Шумовые характеристики горелки определяли измерителем шума и вибрации ВШВ-003. Прибор устанавливали на расстоянии 1 м от наружной поверхности стены, где была расположена горелка, и на высоте 1,5 м.

Давление (разрежение) в камере регулировали шибером, расположенным на выходе из туннельной печи. Поддерживали давление на

поду в пределах от  $-30$  до  $-50$  Па и под сводом от  $-10$  до  $+10$  Па.

Основные измерения начинали тогда, когда кладка камеры разогревалась из холодного состояния до примерно стационарного теплового режима, наступающего через 6–7 ч. Последующие измерения при переходе горелки на другие параметры начинали через 0,5–3 ч. О стационарности режима судили по постоянству температур кладки, записанных на ленте самописца, а также по тепловому потоку, воспринимаемому водяным калориметром.

Результаты наиболее характерных опытов представлены в таблице. В опытах в продуктах сгорания количество  $\text{CO}$  находилось в пределах 0,03–0,06 %,  $\text{H}_2$  и  $\text{CH}_4$  отсутствовали. При увеличении  $d > 4$  мм наблюдался резкий, свыше 0,1 % рост  $\text{CO}$ , вызванный ухудшением инжекционных возможностей горелки. Поскольку создать большее разрежение в камере технически не представлялось возможным, исследования с большим  $d$  не проводились.

Как следует из результатов измерений, наименьшее значение оксидов азота в продуктах сгорания получено при  $S = 10$ –30 мм в пределах 16–30  $\text{мг/м}^3$ , что соответствует работе горелки с кольцевым инжектором. С увеличением  $S$  до 350–500 мм, то есть для горелки с цилиндрическим инжектором,  $\text{NO}_x$  возрастает в 4–5 раз, до 82–130  $\text{мг/м}^3$ . С изменением расхода газа от 6,2 до 13,3  $\text{м}^3/\text{ч}$  и диаметра сопла от 2 до 3,3 мм средняя температура возрастает от 800 до 1050 °С. Температура отходящих газов также растет от 1022 до 1245 °С, соответственно содержание  $\text{NO}_x$  в продуктах сгорания в случае работы горелки с кольцевым инжектором увеличивается от 16–20 до 28–35  $\text{мг/м}^3$ . Для цилиндрического инжектора количество  $\text{NO}_x$  в этом случае повышается от 82–100 до 118–130  $\text{мг/м}^3$ . Значения  $\text{NO}_x$  для обоих режимов теплообмена отличаются незначительно.

Удаление сопла от рассекателя от  $S = 10$  до 500 мм при постоянных остальных параметрах почти не влияет на  $t_{\text{кл}}$ ,  $t_{\text{кл}}'$ ,  $t_{\text{кл}}''$  и  $t_{\text{Г}}$ , а  $t_{\text{кл}}'$  резко возрастает. При наблюдении через противоположное от горелки окно при  $S = 10$ –30 мм вокруг рассекателя виден темный круг диаметром 200–250 мм на фоне ярко светящейся кладки. С ростом  $S$  до 350–500 мм температуры  $t_{\text{рс}}'$ ,  $t_{\text{рс}}''$  и  $t_{\text{рт}}$  повышаются, и визуально кладка возле рассекателя и сам рассекатель становятся ярко светящимися. Это можно объяснить тем, что с увеличением  $S$  улучшается смешение газа с воздухом, зона горения приближается к рассекателю. При работе горелки с кольцевым инжектором в режиме равномерно распределенного теплообмена температура раструба и корпуса

(трубы) горелки вблизи раструба выше, чем на первом режиме.

Использование кольцевого инжектора позволяет уменьшить шум от 80–85 до 55 дБ, что является фактически фоновым шумом в экспериментальном зале (при отсутствии работы других установок).

Проскок пламени внутрь горелки с кольцевым инжектором наблюдался при снижении расхода газа  $G_{\text{Г}}$  около 0,15–0,20  $\text{м}^3/\text{ч}$ , или 1–3 % от номинальных расходов. При этом горение происходило на внутренней поверхности рассекателя и с увеличением нагрузки перемещалось вне пределов горелки. Если  $S = 150$ –500 мм, проскок пламени происходил при нагрузках около 0,7–0,8  $\text{м}^3/\text{ч}$ , горение наблюдалось внутри трубы. Для устранения проскока приходилось перекрывать газ и разжигать горелку вновь.

## Выводы

Использование способа сжигания газа на горелке с кольцевым инжектором по сравнению с известными аналогами позволяет уменьшить образование оксидов азота в продуктах сгорания в 4–5 раз, значительно уменьшить шум, упростить конструкцию, повысить надежность и срок службы горелки за счет уменьшения температуры рассекателя и раструба, а также увеличить пределы регулирования мощности за счет снижения нагрузок, при которых возможен проскок пламени.

## Список литературы

1. Глинков М.А. Основы общей теории печей. — М. : Металлургиздат, 1962. — 575 с.
2. Пикашов В.С., Петишкин С.А., Еринов А.Е. Экспериментальные исследования трех режимов сложного теплообмена в пламенной печи // Процессы направленного теплообмена. — Киев : Наук. думка, 1979. — С. 142–145.
3. Еринов А.Е., Сорока Б.С. Рациональные методы сжигания газового топлива в нагревательных печах. — Киев : Техника, 1970. — 252 с.
4. А.с. 238068 СССР, МКИ F 23 f. Газовая плоскопламенная горелка / В.Ф.Копытов, А.Е.Еринов, Б.С.Сорока // Открытия, изобретения. — 1969. — № 9. — С. 64.
5. Гориславец С.П., Тимошенко П.Н., Пикашов В.С. Чашеобразная радиационная горелка // Газовая пром-сть. — 1970. — № 2. — С. 33–35.
6. Пикашов В.С., Великодный В.А., Осиевский В.А. Экспериментальное исследование кольцевого инжектора применительно к горелке с плоским пламенем // Энерготехнологии и ресурсосбережение. — 2010. — № 5. — С. 76–80.

Поступила в редакцию 04.08.09

## Gas Combustion by Injector Burner with Annular Injector on Fire Stand

*Pikashov V.S.<sup>1</sup>, Velikodny V.A.<sup>1</sup>, Osievsky V.A.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> *The Gas Institute of NAS of Ukraine, Kiev*

<sup>2</sup> *SE «Ukrmetrteststandart», Kiev*

The investigation results of annular injector burner on fire stand (furnace) are conducted. The operation of annular and common injector burners is compared. The proposed burner design decreases nitrogen oxides emission, splitter temperature and decreases noise by several degrees. The burner is substantially purposed for indirect radiation and convectional heat exchange mode. The burner can be also successfully applied for regular distributed heat exchange mode.

**Key words:** gas burner, annular injector.

Received August 4, 2009

УДК 621.515

## Принципы деформации газодинамических характеристик турбокомпрессоров в процессе эксплуатации

*Быков Г.А.<sup>1</sup>, Быкова О.Г.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> *Национальный авиационный университет, Киев*

<sup>2</sup> *Национальное агентство Украины по вопросам эффективного использования энергетических ресурсов, Киев*

Приведены основные закономерности изменения формы газодинамических характеристик центробежных и осевых компрессоров, которые возникают вследствие неблагоприятного сочетания технологических отклонений при изготовлении или эрозионного износа проточной части при эксплуатации. Эти закономерности получены в результате системного анализа и обобщения экспериментальных газодинамических характеристик и сформулированы в виде принципов, удобных для использования в инженерной практике.

**Ключевые слова:** турбокомпрессоры, газодинамические характеристики.

Наведено основні закономірності зміння форми газодинамічних характеристик відцентрових та осевих компресорів, що виникають внаслідок несприятливого поєднання технологічних відхилень при виготовленні або ерозійного зношення проточної частини при експлуатації. Ці закономірності отримано у результаті системного аналізу та узагальнення експериментальних газодинамічних характеристик та сформульовано у вигляді принципів, зручних для використання в інженерній практиці.

**Ключові слова:** турбокомпресори, газодинамічні характеристики.

В числе многих факторов, определяющих интегральный эффект энергосбережения при эксплуатации турбокомпрессоров различного назначения и, в частности, центробежных нагнетателей (ЦБН) систем магистрального транспорта природного газа наиболее значимым является снижение затрат энергии на их привод. В случае привода ЦБН от газотурбинной установки эффект энергосбережения определяется увеличением коэффициента полезного действия нагнетателя, что приводит к снижению расхода топливного газа в камере сгорания привода, а в

случае электропривода — к снижению потребления электроэнергии [1].

И в первом, и во втором случае абсолютная величина экономии энергии существенно зависит от формы и параметров конкретных газодинамических характеристик ЦБН. При этом под газодинамическими характеристиками понимаются зависимости напора и коэффициента полезного действия ЦБН от расхода газа, проходящего через проточную часть нагнетателя.

Опыт эксплуатации центробежных нагнетателей и осевых компрессоров свидетельствует о