

Список литературы

1. Белоусов В.В. Теоретические основы процессов газоочистки. — М. : Металлургия, 1988. — 256 с.
2. Бусройд Р. Течение газа со взвешенными частицами. — М. : Мир, 1975. — 384 с.
3. Грин Х., Лейн В. Аэрозоли — пыли, дымы и туманы. — Л. : Химия, 1969. — 427 с.
4. Защита атмосферы от промышленных загрязнений : Справ. / Под ред. С.Калверта, Г.М.Инглунда. — М. : Металлургия, 1988. — Ч. 1. — 760 с.
5. Рыжков С.В., Хмара О.М. Повышение эффективности сепарирующего устройства с помощью сотового коагулятора // Вопр. судостроения. — 1979. — № 16.
6. Рыжков С.С., Басок Б.И. Экологические ресурсосберегающие технологии для промышленной теплотехники на основе дисперсных двухфазных сред // Пром. теплотехника. — 2001. — Т. 23, № 4-5. — С. 141-145.
7. Рыжков С.С., Харитонов Ю.М., Благодатний В.В. Методи очищення повітряного середовища від забруднень : Метод. вказів. — Миколаїв : УДМ техн. ун-т, 2002. — 56 с.
8. Рыжков С.С., Харитонов Ю.М., Благодатний В.В. Розрахунок викидів шкідливих речовин в атмосферу : Метод. вказів. — Миколаїв : УДМТУ, 2002. — 44 с.

Поступила в редакцию 27.03.09

The Experimental Installation for Processes of Gas Flow Cleaning from Liquid Highly Dispersed Particles Investigation

Ryzhkov S.S., Litvinov I.V.

National University of Shipbuilding, Nikolaev

The experimental installation for gas flows cleaning from liquid dispersed particles investigation is developed. The efficiency of liquid dispersed particles aerosol sedimentation due to the phenomenon of turbo phoretic force is verified. It is displayed that particles turbo phoretic sedimentation intensification by coagulators application is achieved. The coagulators consist of consistently located multilayered grid rows with various cells diameters and the sizes. The optimal coagulators characteristics are determined.

Key words: gas flow cleaning, aerosols, turbo phoretic force, net-shaped coagulators.

Received March 27, 2009

УДК 662.955

Експериментальное исследование кольцевого инжектора применительно к горелке с плоским пламенем

Пикашов В.С.¹, Великодный В.А.¹, Осиевский В.А.²

¹ *Институт газа НАН Украины, Киев*

² *ГП «Укрметртестстандарт», Киев*

Предложен новый тип инжектора — кольцевой инжектор, предназначенный для газовых горелок, реализующих режим косвенного радиационно-конвективного теплообмена в пламенных печах, и позволяющий снизить выбросы оксидов азота, увеличить ресурс работы горелки и упростить ее конструкцию. Приведены результаты экспериментальных исследований на холодной модели горелки с кольцевым инжектором при различных геометрических и режимных параметрах. Определены оптимальные геометрические параметры горелки.

Ключевые слова: кольцевой инжектор, плоскопламенная горелка.

Запропоновано новий тип інжектора — кільцевий інжектор, який призначений для газових пальників, що реалізують режим непрямого радіаційно-конвективного теплообміну в полум'яних печах, і який дозволяє знизити викиди оксидів азоту, збільшити ресурс роботи пальника і спростити його конструкцію. Приведено результати експериментальних досліджень на холодній моделі пальника з кільцевим інжектором при різних геометричних і режимних параметрах. Визначено оптимальні геометричні параметри пальника.

Ключові слова: кільцевий інжектор, плоскополум'яний пальник.

Согласно теории М.А.Глинкова, работу пламенных печей и топок исходя из распределения в них температур по объему и направлению тепловых потоков, можно разделить на три основных режима: прямой направленный, равномерно-распределенный и косвенный направленный радиационный. Каждый из режимов предназначен для определенного типа печей исходя из требований обрабатываемого материала или поверхностей и других условий [1]. Экспериментальными исследованиями было установлено, что при горении топлива вблизи поверхности резко увеличивается конвективная составляющая по сравнению с обтеканием этой поверхности реагирующими газами при той же температуре, и предложено к классификации режимов добавить радиационно-конвективный теплообмен [2]. Для реализации каждого из режимов необходимо создавать специальные горелочные устройства.

Наши исследования направлены на создание новой эффективной горелки с кольцевым инжектором, работающей в режиме косвенного направленного радиационно-конвективного теплообмена. В таком режиме работает множество печей разной конструкции и в различных отраслях промышленности.

Известные инжекционные горелки такого назначения имеют ряд недостатков [3, 4]: перегрев раскатателя, что ограничивает применение их в высокотемпературных печах или сокращает срок службы, сильный шум. При работе на водородсодержащем газе они имеют узкие пределы регулирования мощности из-за проскока пламени внутрь инжектора. В горелке с двой-

ным подсосом воздуха значительно расширены пределы регулирования мощности, но не устранены большой шум и нагрев раскатателя [4]. Кроме того, горелка имеет сложную конструкцию [5]. Такие отрицательные стороны горелок вызваны тем, что полное или частичное смешение газа с воздухом происходит непосредственно в трубе инжектора.

Разработанная инжекционная горелка отличается тем, что сжигание газа происходит в диффузионном настильном факеле у излучающей стены печи. Это достигается за счет применения предложенного нами инжектора новой конструкции — кольцевого. Данная работа посвящена исследованию кольцевого инжектора на холодной модели с целью определения его оптимальных геометрических параметров.

Опытный вариант горелки (рис.1) содержит газовую трубу 1, одним концом подключенную к магистрали газа. На другом конце трубы установлено сопло 2. Газовая труба и сопло введены с тыльной стороны воздушной трубы 3 и соосны с ней. Воздушная труба с двух сторон плавно переходит во входной 4 и выходной 5 раструбы.

Воздушная труба и выходной раструб вмонтированы внутри футеровки печи 6. Поверхность торца раструба переходит в поверхность футеровки. Напротив раструба соосно с ним и с зазором установлен раскататель 7. Для регулирования необходимого количества воздуха, поступающего на горение, с тыльной стороны расположена заслонка в виде диска 8, которая имеет возможность по резьбе на газовой трубе перемещаться вдоль оси горелки. При настройке и работе горелки фиксация заслонки в требуемом положении осуществляется винтом 9. Центрируют газовую трубу с соплом по отношению к воздушной трубе с помощью распорок 10, приваренных к двум муфтам 11. Газовая труба по отношению к муфтам выполнена по скользящей посадке. Фиксируют муфты на трубе винтами 12. В опытном варианте на холодной модели изменение и фиксация расстояния между раскатателем и раструбом δ производили тремя винтами 13. Трубы горелки крепились на кронштейне 14.

Принцип работы горелки заключается в следующем. Газ из магистрали под давлением поступает в трубу 1 и через сопло 2 вытекает с большой скоростью. Если сопло расположено вблизи раскатателя 7, струя газа ударяется о его носик и газ тонким слоем растекается по криволинейной поверхности, плавно поворачивая на 90° . Вследствие инжекции струя и движущийся слой газа увлекают за собой воздух, создавая разрежение в воздушной трубе 3. Газ и воздух по ходу потоков смешиваются между собой и вытекают через кольцевую щель между раската-

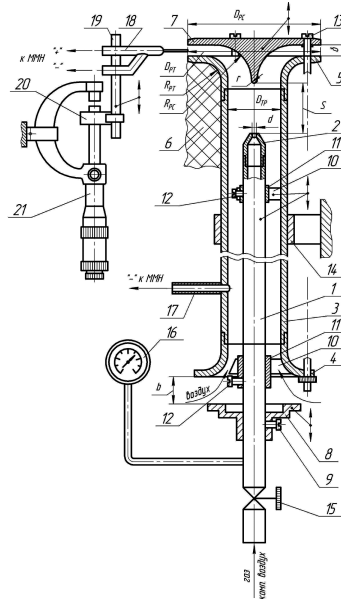


Рис.1. Стенд для холодных исследований опытного образца горелки.

телем 7 и раструбом 5. Очевидно, что при определенных геометрических параметрах системы и расходах газа и воздуха движущихся у поверхности рассекателя слой газа полностью не успеет смешаться с необходимым для полного сгорания количеством воздуха. В таком случае на выходе из кольцевой щели по ее ширине будут неравномерные поля концентраций газа с воздухом и скоростей. Наибольшая скорость потока и концентрация газа на выходе из щели будет у кромки рассекателя, а наименьшие — вблизи поверхности кладки.

На выходе из щели в кольцевой поток смеси будут подмешиваться высокотемпературные продукты сгорания из топки: в начале в слое, расположенные у кромки рассекателя, а затем по ходу потока, постепенно проникая вглубь его. В слоях потока, расположенных ближе к кромке, начнется неполное горение смеси при коэффициентах расхода воздуха $\alpha \ll 1$ и разбавленных продуктами сгорания, а у слоев, расположенных ближе к поверхности футеровки, при $\alpha \gg 1$. Далее по ходу кольцевого потока произойдет окончательное смешение газа с воздухом, а также с высокотемпературными продуктами сгорания и полное догорание газа при обеспечении суммарного количества воздуха, соответствующего $\alpha \geq 1$.

Таким образом, горелкой реализуются известные из теории горения методы снижения образования оксидов азота: во-первых, подмешивание в газо-воздушную смесь продуктов сгорания; во-вторых, обеспечение сгорания топлива в несколько стадий [6, 7]. Если в рассмотренной конструкции сопло расположить на значительном расстоянии от рассекателя, горелка с кольцевым инжектором превращается в известную инжекционную горелку типа чашеобразной или плоскопламенной. В последнем случае газовая струя полностью смешается с воздухом и эпюры концентраций газа и скоростей потока на выходе из кольцевой щели будут равномерными.

Цель проведенных исследований на холодной модели определить максимальную скорость и концентрацию газа у кромки рассекателя на выходе потока из кольцевой щели, а также максимальное разрежение в воздушной трубе в зависимости от диаметров газового сопла d , воздушной трубы $D_{тр}$, геометрии и радиусов рассекателя $R_{рс}$ и выходного раструба $R_{рт}$, их диаметров $D_{рс}$ и $D_{рт}$, расстояния между носиком рассекателя и кромкой выходного отверстия сопла S , ширины кольцевой щели между рассекателем и выходным раструбом δ и ширины щели между входным раструбом и заслонкой b .

В опытной горелке подача газа или компрессионного воздуха, имитирующего газ, осуществлялась трубой Ш 12×1 мм вентилем 15. Давление в трубе измеряли манометром 16. На трубу 1 на-

винчивали сменные сопла 2 с различным внутренним диаметром d . Воздушная труба 3 во всех опытах имела постоянные размеры: $D_{тр} = 50$ мм, длина 550 мм. Размеры и форма входного патрубка также были постоянными. Форма и размеры выходного патрубка ($D_{рт}$ и $R'_{рт}$) и рассекателя ($D_{рс}$, $R'_{рс}$ и r) были переменными.

Для измерения разрежения внутри воздушной трубы на расстоянии примерно 100 мм от входа к ней был подключен штуцер 17, который гибким шлангом подсоединялся к микроманометру ММН. Поле скоростей потока на выходе из щели определялось микропневмотрубкой типа Пито 18. Наружный диаметр чувствительного элемента трубки 0,95 мм. Стандартное соотношение размеров носика трубки обеспечило коэффициент $k = 1,0$.

Трубка Пито припаяна к держателю 19, который прикреплен к шарикоподшипнику 20, насаженному на подвижный шуп микроманометра 21, прикрепленный к базе с установленной горелкой.

Такая система с трубкой Пито использовалась для отбора смеси газа с воздухом при определении поля концентраций потока по ширине выходной щели. К патрубку «+» подключалась емкость для отбора газа. Анализ смеси (при соответствующем ее разбавлении воздухом) производился прибором «Газохром 3101».

Форму поверхностей рассекателя и раструба выбирали такими, чтобы потоки воздуха и газа, ограниченные и направляемые этими поверхностями, плавно поворачивали на 90°. Таким требованиям лучше всего удовлетворяет форма поверхности рассекателя, представляющая собой поверхность вращения четверти окружности с радиусом $R_{рс}$, у которого одна крайняя касательная совмещена с осью вращения и осью воздушной трубы, а вторая перпендикулярна первой касательной. Форма поверхности раструба должна представлять собой поверхность вращения четверти окружности с радиусом $R_{рс}$ вокруг оси воздушной трубы, причем одна крайняя касательная окружности должна совпадать с касательной цилиндра, внутренней образующей трубы, а вторая — быть перпендикулярной первой.

Самая меньшая площадь кольцевого сечения между раструбом и рассекателем по нормали к газозадушному потоку должна быть на выходе потока из кольцевой щели горелки. В противном случае вследствие расширения и завихрения потока возможны гидравлические потери и переход динамического напора в теплоту и снижение показателя инжекции, а также лучшее смешения газа с воздухом между рассекателем и раструбом и большая вероятность проско-

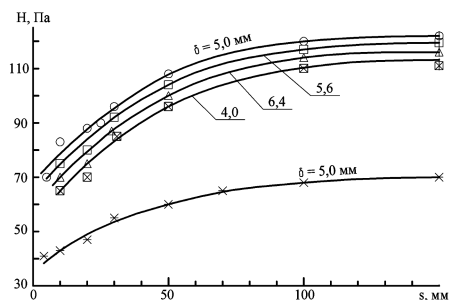


Рис.2. Зависимость разрежения Н от расстояния сопла S при различных δ . Верхние кривые: $d = 2$ мм, $P = 0,1$ МПа; нижняя кривая: $d = 3,3$ мм, $P = 0,12$ МПа.

ка пламени в горелку. По этой же причине диаметры рассекателя $D_{рс}$ и раструба $D_{рт}$ должны быть, по-возможности, минимальных размеров и равны между собой.

Экспериментально установлено, что при погрешности в несоосности установки сопла по отношению к рассекателю необходимо носик рассекателя скруглять для обеспечения равномерного потока газов по окружности кольцевой щели. Проведены сравнительные опыты с рассекателем при $D_{рс} = D_{рт} = 100$ мм, носик которого имел острие и скругление при $r = 1,5; 2,5; 3,5$ и 5 мм и соплах с $d = 2$ и $3,3$ мм. Скорости потока измеряли по окружности щели через 90° , несоосность изменяли в пределах $0-5$ мм и углах оси сопла $3-5^\circ$ при $\delta = 5 \pm 0,1$ мм и $S = 15$ мм. При максимальных и перечисленных параметрах и скругленном носике неравномерность потока по окружности доходила до 10% , при остром носике имела значение около 18% . Отмечено также влияние диаметра сопла: с увеличением d уменьшается неравномерность по окружности щели. На основе опытов принято, что $r = (0,5-1)d$.

Проведены исследования по определению оптимальных относительных размеров рассекателя и раструба: радиусов $R'_{рс}$ и $R'_{рт}$, мм: 10 и $35; 15$ и $40; 20$ и $45; 25$ и $50; 30$ и 55 : при $d = 3,3$ мм; $\delta = 5$ мм; $S = 20$ мм; $r = 2,5$ мм; $b = 30$ мм. Установлено, что наибольшее разрежение при $R_{рс} = 50$ мм и $R_{рт} = 25$ мм.

Зависимость Н от δ (мм) и b при $d_c = 3,3$ мм и $P = 0,04$ МПа

b, мм	Н, Па							
	$\delta = 0,9, S = 5$ мм	$\delta = 1,7, S = 5$ мм	$\delta = 2,5, S = 7,5$ мм	$\delta = 3,3, S = 8,0$ мм	$\delta = 4,0, S = 8$ мм	$\delta = 4,8, S = 9$ мм	$\delta = 5,6, S = 10$ мм	$\delta = 6,4, S = 10$ мм
30	4	1,2	2,4	3,4	4	4,4	4,0	3,6
10	-	2,4	4,6	6,2	7,2	7,2	6,8	6,0
7	8	3,8	6,6	8,6	10	9,8	9	7,6
5	16	5,8	10	12,2	12,8	11,8	10,8	9,0
3	-	10,8	14	15	14,4	14	12,4	10,4
2	54	17,8	17,8	16,6	15,6	15	13,4	11,6
1	102	18,4	18,4	17,8	16	15,2	13,6	11,8

Влияние на разрежение Н ширины выходной кольцевой (δ) и входной (b) щелей приведены в таблице. С увеличением δ от $0,9$ до $4,8$ мм при $b = 30$ мм разрежение возрастает с 4 до 40 Па, а при $b = 1$ мм — с 102 до 152 Па. Затем при последующем увеличении δ , т.е. при $5,6$ и $6,4$ мм разрежение падает, так при $b = 30$ мм до 40 и 36 Па, а при $b = 1$ мм до 136 и 118 Па. Следовательно, оптимальное значение $\delta = 4,8-5,0$ мм. Изменение b от 30 до 1 мм приводит к возрастанию разрежения, например, при $\delta = 4,8$ мм от 44 до 152 Па. Отметим, что равновеликое по площади к внутреннему сечению трубы сечение

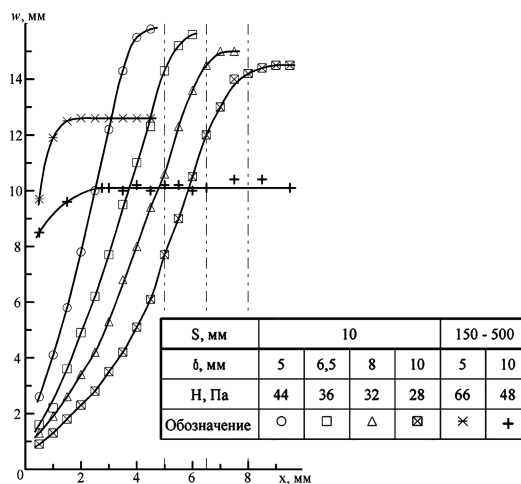


Рис.3. Влияние на распределение скоростей w по ширине щели x и на разрежение Н параметров δ и S при $d = 3,3$ мм, $P = 0,04$ МПа и $b = 30$ мм.

входной щели находится, когда $b = 10-12,5$ мм, при этом $H = 72-68$ Па.

Характер изменения Н от S при различных δ показан на рис.2. При всех значениях δ с увеличением S разрежение возрастает. Для оптимальной $\delta = 5$ мм разрежение изменяется в $1,7$ раза, а при оптимальных значениях $S = 3,3$ мм в $1,5-1,3$ раза. Хотя разрежение для кольцевого инжектора ниже, чем для цилиндрического, однако при таких Н подсасываемого количества воздуха вполне достаточно для полного сжигания газа.

Эпюры скоростей на выходе из щели кольцевого инжектора при $S = 10$ мм и $b = 30$ мм для различной ширины щелей $\delta = 5; 7,5; 8$ и 10 имеют подобный характер (рис.3). Однако наибольшая неравномерность распределения скорости по ширине щели при $\delta = 5$ мм. Этими опытами также подтвержден максимум разрежения при $\delta = 5$ мм. Для сравнения на графиче-

ке нанесены данные, полученные при $S = 150\text{--}500$ мм и $\delta = 5$ и 10 мм и таких же остальных параметрах.

Кривые скорости имеют, в основном, горизонтальные участки и только вблизи раструба скорость уменьшается, что вызвано, по-видимому, влиянием центробежных сил при резком повороте потока, и разрежение соответственно при этом несколько выше.

Согласно опытам, наибольшая неравномерность скоростей отмечается при S в пределах $10\text{--}20$ мм. Более резкий наклон имеют кривые, относящиеся к $d = 2$ мм и большему давлению перед соплом. С увеличением S кривые становятся более пологими. Для горелки с определенными параметрами принимаем $S = 10\text{--}20$ мм. При $S < 10$ резко снижаются инжекционные возможности горелки (рис.2).

Для оценки точности проведенных измерений в каждом из опытов выполнены сравнительные расчеты расхода воздуха, проходящего через горелку, по двум параметрам. Во-первых, по разрежению в трубе с учетом коэффициента истечения при входе в трубу $\zeta = 0,8$; во-вторых, по средней скорости потока на выходе из кольцевой щели с учетом дополнительного расхода воздуха, выходящего из сопла. Расчеты по этим двум параметрам совпали со средней квадратичной погрешностью $y = \pm 2,5\%$ при $n = 10$.

Выполнены исследования распределения полей концентраций природного газа в воздухе на выходе потока из кольцевой щели по ее ширине. В сопло вместо компрессорного воздуха подавали природный газ с таким же давлением, как и предыдущих опыта. Суммарный расход воздуха через горелку регулировали перемещением заслонки на входе в трубу и подбирали таким, который примерно соответствует коэффициенту избытка воздуха $\alpha = 1,0\text{--}1,1$. Параметр b находился в пределах $6\text{--}10$ мм. Можно отметить, что кривые распределения концентраций по ширине щели при $S = 10$ мм имеют резко выраженный неравномерный характер, аналогичный распределению

скоростей, но с большим наклоном кривых. Концентрация изменяется по ширине примерно в 10 раз. При $S = 500$ мм концентрация щели равномерная, что свидетельствует о хорошем перемешивании газа с воздухом.

Таким образом, экспериментально подтверждена неравномерность концентраций природного газа в потоке воздуха по ширине щели кольцевого инжектора и ее подобие распределению скоростей потока по ширине щели. Кольцевой инжектор может быть использован в новой конструкции горелки с пониженными выбросами оксидов азота и большим ресурсом эксплуатации для реализации режима косвенного радиационно-конвективного теплообмена в печах и других агрегатах.

Список литературы

1. Глинков М.А. Основы общей теории печей. — М. : Металлургиздат, 1969. — 575 с.
2. Пикашов В.С., Петишкин С.А., Еринов А.Е. и др. 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. — 251 с.
4. Гориславец С.П., Тимошенко П.Н. Экономия топлива в печах нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств // Газовая пром-сть. — 1982. — № 7. — С. 29–30.
5. Пат. України на винахід № 536, МКІ F 23 D 14/12, В.М. Дмитрієв, В.С. Пікашов, В.О. Великодний // Газовий радіаційний пальник. — Опубл. 15.03.93, Бюл. №2.
6. Сигал И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. — Л. : Недра, 1988. — 312 с.
7. Крижановский В.Н. Образование и технологические метод подавления оксидов азота при горении топлива // Пром. теплотехника. — 1990. — Т. 12, № 5. — С. 81–101.

Поступила в редакцию 17.03.09

The Experimental Investigation of Annular Ijector for Plane Grazing Jet Burners

Pikaschov V.S.¹, Velikodnyy V.A.¹, Osievsky V.A.²

¹The Gas Institute of NASU, Kiev

²State Enterprise «Ukrmetrteststandart», Kiev

The new type of injector namely annular for gas burners of indirect radiation convention heat exchange operating conditions in flame furnaces is proposed. The injector decreases NOx emissions, increases burners overhaul period and simplifies burner design. The results of burner with annular injector experimental investigation on cold model with of various geometrical and operating conditions are presented. Optimal burner geometrical parameters are determined.

Key words: annular injector, plane grazing jet burner.

Received March 17, 2009