УДК 621.181:662.921

ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТА СОХРАНЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ КРУТКИ ЯДРА ПОТОКА ПРИ ОБЩЕМ СНИЖЕНИИ КРУТКИ НА ГОРЯЩИЙ ФАКЕЛ ГОРЕЛКИ

Потапов В.Н., Костюнин В.В.

ООО «Вихревые системы», Екатеринбург, Россия

АННОТАЦИЯ

Обычные представления о связи интенсивности крутки потока при его выходе из горелки со свойствами факела часто не позволяют стабилизировать горение и размеры факела одновременно с полнотой выгорания топлива и с экологической безопасностью горения. Приводятся опыт использования установленного авторами сохранения крутки ядра потока для стабилизации горения при снижении крутки потока для формирования необычных факелов оригинальным способом влияния на поток внутри горелки.

ВВЕДЕНИЕ

Экологичное и полное сжигание топлив в факелах вихревых горелок определяется структурой потока, в который вводят топливо для воспламенения и сжигания. Современный стадийный процесс сжигания зависит от закрутки воздушных потоков горелками, конструктивными особенностями их завихрителей воздуха (регистров) и глубиной влияния на факел, а также на его взаимодействия в топке с факелами других горелок. Авторами опробован на простых моделях горелок новый способ управления закрученными потоками с помощью способа, исследованного в конце 70-х годов на холодных моделях, но опробованного в некоторых проявлениях для воздействия на индивидуальные горящие факела лишь много позже. Этот новый способ управления сильно закрученным потоком - струйный радиальный вдув воздуха (СРВ) в поток через перфорированную стенку выходного канала горелки со скоростями, соизмеримыми уровню скоростей в самом потоке при его закрутке регистром. На моделях горелок был получен необычно широкий диапазон воздействия на структуру и крутку формируемого потока (вихря, факела), превышающий аналогичные возможности воздействия всех известных нам конструкций вихревых горелок и ряда других устройств.

Интенсивный СРВ через стенку выходного канала горелки с любым нерегулируемым регистром способен превратить нерегулируемую вихревую горелку в регулируемую, причем с необычно широким диапазоном регулирования, а сложную многоканальную конструкцию вихревой горелки стандартного типа заменить на простую конструкцию высокоэкономичной горелки для экологически безопасного сжигания практически любого энергетического топлива. Вихревые горелки с управляющим СРВ считаем новым классом горелок, который идеально подходит для реализации наиболее эффективных техногоий сжигания с глубоким подавления образования оксидов азота (NOx), одновременно с почти полным подавлением неполноты сгорания топлива, обычно имеющей место при горении с глубоким подавлением выбросов NOx в схемах двух и трехстадийного сжигания.

Мы разработали горелки такого типа на базе стандартных или известных отечественных конструкций, не воспринятые, за редким исключением, специалистами инжиниринговых фирм и энергетических компаний. Отдельные внедрения таких горелок с минимальной долей реализации возможностей СРВ на потоки позволили получить на практике те или иные рекордные показатели их работы в топках котлов: например, понизить аэродинамическое сопротивление горелок до 200-300 Па с устойчивым горением газа или снизить выбросы NO_x до требований стандартов ряда европейских стран при сохранении предельно низких избытков воздуха в топке и за ней.

© Потапов В.Н., Костюнин В.В.

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ НОВЫХ ГОРЕЛОК, РЕЖИМОВ ИХ РАБОТЫ И ХАРАКЕТРА ЗАКРУТКИ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ

В последние 7-8 лет в небольшой частной лаборатории мы опробовали воздействие управляющего СРВ на горящий газовый и пылеугольный факела нескольких прототипов новых горелок на их моделях малой мощности [1]. Некоторые необычные результаты опытов и предварительные обобщения изучения структуры закрученных потоков при влиянии на них управляющих СРВ приведены в данном тексте. Они объясняют ряд необычных наблюдавшихся трансформаций горящих факелов, например, при работе водогрейного котла с топкой ЦКС с 1991 по 1995 год, который в отопительные периоды сжигал газ с помощью опытных горелок [2] с управляющим СРВ тепловой мощностью до 5 МВт каждая (Рис.1). Горелки имели очень длинные узкие горящие факела (8-10 калибров амбразуры) пониженной крутки со стабилизацией горения тем же СРВ . Горение было устойчивым, хотя при включенном СРВ крутка формируемых факелов, снижалась ниже уровня, при котором всегда происходят обрывы факелов горелок с таким же типом регистра закрутки воздуха. Опытные горелки с включенным СРВ имели рекордно низкое аэродинамическое сопротивление – всего лишь 200-230 Па при номинальной тепловой нагрузке 3-3,5 МВт.

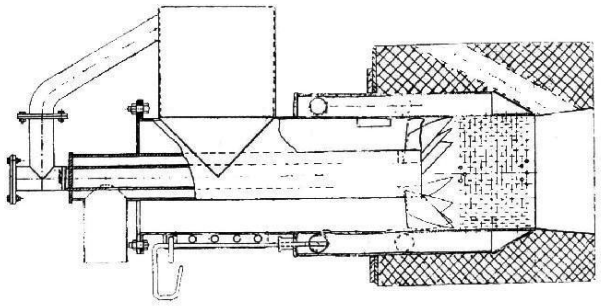

Рис.1 Схема модели простейшей вихревой горелки с управляющим струйным вдувом через стенку ее выходного цилиндрического канала в топке ЦКС водогрейного котла.

Упрощенная модель таких горелок [3] мощностью 50-100 Вт с регистром из неподвижных лопаток имела выходной канал. Его стенка была перфорирована отверстиями, и через них в закрученный поток радиально вдувалась часть воздуха для горения. Скорости струй СРВ были соизмеримы со скоростями воздуха в самом вихре в канале. Такой вдув через стенку подтвердил его необычно высокую эффективность управления факелом. Интенсивность СРВ положена нами как относительный радиальный импульс струй вдува в отверстиях перфорации стенки канала. Это среднерасходный импульс всех струй СРВ в отверстиях перфорации стенки, отнесенный к осевому интегральному импульсу всего потока при выходе его из модели. Это отношение принято нами за параметр интенсивности СРВ:

$$k = K_{вд}/K_{вых} \quad (1)$$

Здесь Квд – среднерасходный радиальный интегральный импульс струй СРВ в отверстиях стенки, а импульс Квых, как и интегральный поток момента количества движения М вых, выносимые вдоль оси вращения из горелки, мы определяли ранее интегрированием радиальных полей скоростей и давлений, полученных экспериментально у выхода потока из цилиндра на одной из ранних моделей горелки с управляющим СРВ. Интенсивность крутки всего потока на выходе из этой и других моделей нами определялась традиционно, аналогично известному подходу Дубова-Бэра-Червинского-Лойцянского:

$$\Theta = C \cdot M_{вых} / K_{вых} \cdot D \quad (2)$$

Здесь С = 4, а величина D равна внутреннему диаметру канала (амбразуры) горелки. Интенсивность СРВ при зондировании потока пневмометрическим зондом изменялась от k = 0 до k = 1,1. На моделях с горением газа и управляющим СРВ параметр k достигал значений k = 1,5 - 1,6. В рамках работ, выполненных нами в разные годы, показано, что не только крутка всего потока изменялась при воздействии на него управляющего СРВ, но и крутка отдельных зон потока изменялась, причем по-разному. Поэтому с помощью СРВ можно за одним и тем же регистром получать не похожие друг на друга факела, даже такие, какие, видимо, невозможно получить с помощью известных горелок с основными типами регулируемых регистров. На рисунке 2 показано воздействие СРВ на значение относительной крутки $\Theta/\Theta_{k=0}$ всего, интегрального вихря. Здесь $\Theta_{k=0}$ – это интегральная крутка вихря на выходе из горелки или из ее модели при выключенном СРВ.

Отметим, что при трансформации вихря (потока) в цилиндре управляющим СРВ, а так

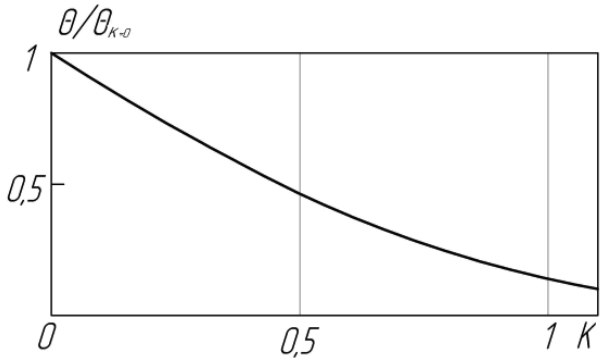

Рис.2 Относительная крутка интегрального вихря при включении и усилении СРВ.

же на выходе из него только лишь крутка сужающейся при вдуве зоны приосевого обратного тока (ЗПОТ) имеет такой же характер изменения, как и изменение крутки интегрального или результирующего потока (вихря). Изменения крутки отдельных характерных областей потока обычно не совпадали с изменениями крутки всего потока. Частные, относительные крутки иных, условно выделенных нами зон вихря, обозначим далее как:

$$\omega/\omega_{k=0} \qquad (3)$$

Значения величин ω и $\omega_{k=0}$, также как и $\Theta/\Theta_{k=0}$, были найдены из тех же профилей скоростей и давлений по формуле (3), но с определением диаметра D как внешних границ выделенных областей потока. Далее (Рис.3) представлены изменения значений подобной крутки для трех важных, частных зон потока (вихря). Во-первых, это кольцевая область вихря (Рис.3, - а), которая переносит вдоль оси вращения вихря основную долю момента вращения потока, точнее, потока момента вращения. Это так называемая рядом авторов характерная зона квазипотенциального вращения (ЗКПВ). Она содержит базовую часть вихря, - от узкой пристенной зоны (расширяющейся при усиления СРВ) до внешней границы другой характерной области вихря – зоны приосевого обратного тока (ЗПОТ), а изменение относительной крутки приосевой зоны ЗПОТ показано справа на Рис.3, - б. Однако наиболее интересно и важно как для инженерной практики, так и для составления адекватных теоретических моделей, изменение безразмерной крутки при включении СРВ в цилиндрической зоне, условного ядра потока (ЯП), включающей в себя сумму областей ЗКПВ и ЗОТ (Рис.3, в), которая как все иные зоны сужается в потоке при усилении СРВ.

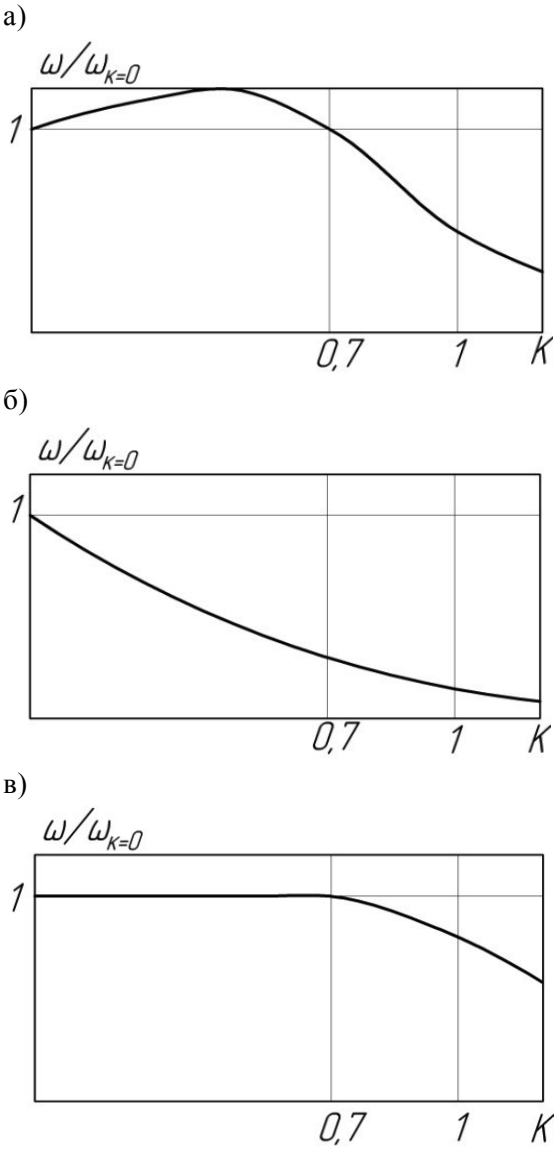

Рис.3 Относительная крутка интегрального вихря при включении и усилении СРВ: а) – ЗКПВ; б) – ЗПОТ; в) - ЯП

Сопоставляя графики рисунков 2 и 3, можно однозначно установить, что в диапазоне усиления интенсивности СРВ $0 \geq k \leq 0{,}7$ при ослаблении крутки всего потока на выходе из горелки примерно в 3 – 3,3 раза, крутка кольцевой области ЗКПВ даже увеличивалась, и только при $k \approx 0{,}7$ начинала быстро уменьшаться. Одновременно в весьма узкой зоне приосе-

вого обратного тока (ЗПОТ) крутка уменьшалась аналогично крутке интегрального потока (Рис.2), которая противоположно всему потоку вносит в устье горелки небольшую долю потока момента вращения факела на срезе горелки (8-2%). Самым важным считаем замеченный нами эффект сохранения интенсивности крутки ядра потока (ЯП), которое включает основную часть всего потока и формируемого факела (Рис.3, в), где происходят основные процессы воспламенения и стабилизация горения и выгорания основной массы топлива. В диапазоне усиления СРВ $0 \geq k \leq 0,7$ вместе с ослаблением крутки всего потока на выходе из горелки крутка кольцевой области ЗКПВ остается неизменной, - то есть сохраняются все базовые условия для воспламенения топлива и стабилизации его горения, несмотря на снижения крутки всего потока и факела на его основе более трех раз. Этот очень необычный эффект позволяет объяснить стабильное, надежное и полное сжигание природного газа в формально слабозакрученном длинном факеле, имеющем, тем не менее, в центральной части вихря оптимальные условия для воспламенения газа и его устойчивого горения. Причем в этом случае полностью отпадает необходимость устанавливать на оси горелки плохообтекаемые тела или выделять отдельный канал на оси для подачи воздуха с закруткой неподвижным, иначе неуправляемым лопаточным регистром, обычно аксиального типа. Эти регистры, как правило, имеют еще и высокие значения коэффициентов аэродинамического сопротивления.

Попутно, в самых ранних исследованиях моделей горелок со струйным вдувом [4], нами было установлено, что при соотношении интегрального импульса вдува Kвд и осевого интегрального импульса Kвых вихря, равном примерно 0,7 ($k \approx 0,7$), у стенки перфорированного цилиндра, уменьшалась до нуля вращательная скорость ($W\varphi=0$) вихря. То есть струи СРВ изолировали от стенки цилиндра всю закрученную часть потока. Далее усиление СРВ ($k \geq 0,7$) вызывало и дальнейшее удаление вращающейся части вихря от стенки канала и даже появление у стенки в этой пристенной кольцевой зоне области встречного вращения, также переносящей момент вращения, который равный моменту вращения, вышедшему в тех же режимах в радиальном направлении ядром вихря.

Опробование упрощенной модели опытной горелки (Рис.1), теплой мощностью 50-100 кВт [5], с сжиганием газа подтвердило возможность необычно сильного воздействия с помощью СРВ на характеристики горящего факела при устойчивом воспламенении и горении газа. Так при относительно слабой интенсивности СРВ нами получены факела, подобные факелам многих стандартных, чаще небольших горелок водогрейных котлов и печей, удлинявшихся и интенсифицировавшихся по мере усиления СРВ (Рис.4).

Рис.4 Факела упрощенной модели горелки при выключенном СРВ (слева вверху) и при слабом СРВ и его умеренном усилении (направо вниз).

Дальнейшее усиление интенсивности СРВ, примерно до режимов глубокого снижения уровня вращательных скоростей у стенки выходного канала модели горелки вызывает появление за ней очень характерного факела, напоминающего факела мощных горелок паровых котлов электростанций. В подобных факелах обычно реализуются разнообразные приемы организации двухстадийного сжигания (Рис.5).

Рис.5 Устойчивые факела при условно двухстадийном сжигании газа со снижением крутки потока на выходе из модели до уровня создания условий обрыва факела обычных горелок и даже за пределами этих условий обрыва их факелов.

Причем напомним, что в нашей модели горелки отсутствует многоканальность с изменяемыми и управляемыми расходами воздуха по каналам и регулирование закрутки воздуха в каждом из выделенных каналов, а крутка потока при выходе из горелки снижается до уровня, опасного по обрыву факела.

Дальнейшее усиление СРВ с полным отстранением основного вихря, образующего факел, от стенки выходного канала модели вызвало, во-первых, отстранение горящей части факела от горелки, а во-вторых, преобразовало горящий факел в необычный характерный вид «бутылочного горла» (Рис.6, слева вверху). Газ горел устойчивым голубым пламенем, а его догорание происходило в центральной розовой стержневой части факела, с явной изоляцией его основной части «стержня» от самого «бутылочного горла» при усилении интенсивности СРВ (Рис.6, справа внизу). Эти образы факела позволяют предположить возможность перехода двухстадийного горения в схему горения трехстадийного, ожидая при этом более глубокое подавление образования NOx при завершении горения.

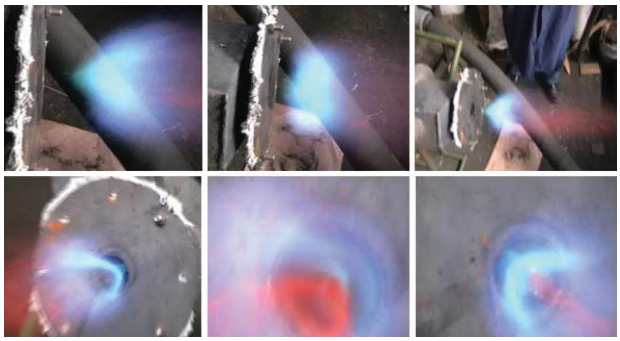

Рис.6 Факела при интенсивном СРВ, с полной изоляцией закрученного потока от стенки выходного канала модели горелки, с потенциалом реализации схем сжигания с более глубоким подавлением образования оксидов азота.

Дальнейшее усиление управляющего СРВ вызвало совершенно неожиданное для нас и необычное явление. Факела, представленные на рисунке 6, теряли свою узкую часть с горением непосредственно в приосевой зоне потока внутри выходного канала. Горение топлива полностью вытеснялось из горелки, указывая на то, что потеря момента вращения и снижение крутки потока и в ядре и в обратном токе уже не обеспечивало поддержание интенсивности крутки и уровня пониженного давления на оси вращения достаточных для устойчивого воспламенения топлива в горелке. При этом потери момента вращения на стенках горелки были нулевыми, и выталкивание слабо закрученным воздушным потоком горящей области факела за горелку в пространство приводило к расширению (увеличению сечения) горящей области, увеличивая сечение и расход газа области ЗПОТ. Именно это поддерживает воспламенение в открытом пространстве слабо закрученной, но хорошо перемешанной смеси топлива с воздухом. Балансировка скоростей и выноса из горелки потоков момента вращения и осевого импульса обеспечили удержание области горения в свободном пространстве с помощью условно радиальной эжекции воздуха. Интегральный условно радиальный импульс воздуха, эжектируемого в зону горения, имеет достаточный радиальный импульс – аналог СРВ в канале горелки (условно соблюдено условие течения закрученного потока в канале - примерно при $k \approx 0{,}7$), вызывает стабилизацию процесса воспламенении и горения смеси воздуха и топлива в условно замкнутой зоне воздушного пространства на выходе из горелки. Наши оценочные расчеты [6] подтверждают, что в режимах, близких с созданию условий схлопывания приосевого обратного тока, должны усиливаться процессы интенсивного турбулентного обмена в приосевой области вихря.

Рис.7 Устойчиво горящие факела в свободном пространстве за пределами горелки.

Устойчивая зона горения в пространстве (Рис.7) всегда имела форму тора голубого цвета, где происходит воспламенение и частичное сгорание топлива. За тором, диаметр которого почти в 2 раза превышает диаметр выходного окна (амбразуры) горелки. Далее всегда имеется более протяженная красная область дожигания горючих газовых компо-

нентов, видимо, с дефицитом кислорода. Это полезно для восстановления хотя бы части NOx, которые были образованы в процессе горения газа в исходном тороидальном вихре. Усиление СРВ приводит к удалению горящей зоны от горелки. При удалении горящей тороидальной части от горелки на расстояние, примерно равном 6–7 калибрам кК выходного окна, горящая область рассыпается и погасает (Рис.7, справа).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опытно доказано, управляющий СРВ через стенку выходного канала горелки приводит не только к изменению структуры и крутки потока в предельно широком диапазоне, но и делает возможным создание с помощью простой горелки с нерегулируемым регистром факелов, характерных для вихревых горелок разных типов, - и даже таких закрученных турбулентных факелов, формирование которых, видимо, вообще невозможно известными нам типами вихревых горелок для факельного сжигания газообразных топлив.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авт. свид. СССР №579499. Газомазутная горелка / Е.В.Волков, С.М.Суслов, В.Н.Потапов и др.

   Avt. svid. SSSR №579499. Gazomazutnaya gorelka / E.V.Volkov, S.M.Suslov, V.N.Potapov i dr.

2. Авт. свид. СССР №826140. Газомазутная горелка / В.Н.Потапов, Е.В.Волков

   Avt. svid. SSSR №826140. Gazomazutnaya gorelka / V.N.Potapov, E.V.Volkov

3. Авт. свид. СССР №926433. Вихревая горелка / В.Н.Потапов, Е.В.Волков

   Avt. svid. SSSR №926433. Vikhrevaya gorelka / V.N.Potapov, E.V.Volkov

4. Потапов В.Н., Костюнин В.В., Копейка А.В. О неодинаковости закрутки отдельных зон потокв поперечном сечении аппарата // доклад на VI Международной конференции по тепло и массообмену MIF 2008, Минск, 19-23 мая 2008. С.144-146.

   Potapov V.N., Kostyunin V.V., Kopeyka A.V. O neodinakovosti zakrutki otdelnykh zon potokv poperechnom sechenii apparata // doklad na VI Mezhdunarodnoy konferentsii po teplo i massoobmenu MIF 2008, Minsk, 19-23 maya 2008. S.144-146.

5. Пат. РФ на полезную модель № 58661. Прямоточно-вихревая горелка / Костюнин В.В. Потапов В.Н. и др.

   Pat. RF na poleznuyu model № 58661. Pryamotochno-vikhrevaya gorelka / Kostyunin V.V. Potapov V.N. i dr.

6. Потапов В.Н. Новый способ управления закрученными потоками в устройствах для сжигания топлив // Электрические станции. 2012. № 10. С.28-33.

   Potapov V.N. Novyy sposob upravleniya zakruchennymi potokami v ustroystvakh dlya szhiganiya topliv // Elektricheskie stantsii. 2012. № 10. S.28-33.