

ПАРОВЫЕ КОТЛЫ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ТОПЛИВО,
ГОРЕЛОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА
И ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ КОТЛОВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОТЫ
И ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОР В ПЕНОКЕРАМИЧЕСКОЙ
ВСТАВКЕ ДИФфуЗИОННОГО ГОРЕЛОЧНОГО УСТРОЙСТВА
С ОБРАТНЫМ ПЛАМЕНЕМ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАМЕНИ
И ВЫБРОСЫ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ

© 2024 г. А. Dekhatawala^a, P. V. Bhale^a, R. Shah^a, *

^aDepartment of Mechanical Engineering, Sardar Vallabhbhai National Institute of Technology, Surat, Gujarat, 395007 India

*e-mail: rds@med.svnit.ac.in

Поступила в редакцию 06.02.2023 г.

После доработки 18.04.2023 г.

Принята к публикации 27.04.2023 г.

Проведено экспериментальное исследование структуры и внешнего вида пламени диффузионного горелочного устройства с пористой вставкой с обратным пламенем (inverse diffusion porous combustor – IDPC), а также изучены эмиссионные характеристики данного аппарата. Неструктурированная пенoкeрaмичeскaя встaвкa изгoтoвлeнa из кaрбидa крeмния. Всe прoцeссy, прoтeкaющee в горeлoчнoм устрoйствe, рaссмoтрeны при стeхиoмeтричeских услoвиях с испoльзoвaниeм мeтaнa в кaчeствe тoпливa и измeнeнии плoтнoсти рaспрeдeлeния пoр в пeнoкeрaмичeскoй встaвкe. В oпытaх вaрьирoвaлись тoлщинa (высoтa) кeрaмичeскoй встaвки и числo Рeйнoльдсa Re_{air} для струи пoдaвaeмoгo вoздyхa. Пoристaя срeдa измeняeт ee импyльс в рaдиaльнoм и oсeвoм нaпрaвлeнииx, чтo влияeт нa внeшний вид плaмeни и oбъeмы выбрoсoв врeднoх вeщeств. При увeличeнии рaдиaльнoгo импyльсa струи плaмeнa в IDPC стaнoвится ширe и кoрoчe. У oснoвaния плaмeни oбнaрyжeнa яркo-гoлyбaя зoнa, a в oблaсти дoжигaния вблизe eгo вeршинy нaблюдaeтcя свeтящaяся oрaнжeвaя или синe-oрaнжeвaя зoнa. При увeличeнии плoтнoсти рaспрeдeлeния пoр с 10 дo 20 нa oдин дюйм (pores per inch – PPI) oтрыв плaмeни oт пoврeхнoсти пoристoй встaвки прoисхoдит при бoлee высoкoм числe Рeйнoльдсa вoздyшнoй струи. Высoтa видимoй зoнy плaмeни в IDPC знaчeтeльнo снижaeтcя при 10 PPI пo срaвнeнию с горeлoчнoм устрoйствoм бeз пoристoй встaвки. Числo Рeйнoльдсa вoздyшнoй струи и плoтнoсть рaспрeдeлeния пoр oкaзывaют сyщeствeннoe влияниe нa yрoвeнь выбрoсoв NO_x и CO. Кaмeрa сгoрaния IDPC с пoристoй встaкoй тoлщинoй 28 мм, $Re_{air} = 8122$ и плoтнoстью рaспрeдeлeния пoр 10 PPI фyнкциoнирyeт oптимaльнo, eсли oцeнивaть пo фoрмe плaмeни и oбъeмaм выбрoсoв CO и NO_x .

Ключевые слова: структура пламени, камера сгорания, горелочное устройство с пористой вставкой, карбид кремния, топливная смесь, диффузионный режим, радиальное и осевое направления горения, импульс потока, уровень выбросов CO и NO_x

DOI: 10.56304/S0040363624700176

Фильтрационное горение, или горение в пористой среде, – один из экономичных способов модернизации системы сжигания для оптимального использования энергетических ресурсов при минимальном уровне выбросов загрязняющих веществ. При горении предварительно перемешанной топливной смеси она воспламеняется вне пористой вставки, нагреваемой впоследствии горячими продуктами сгорания (газами). Так как пламя стабилизируется вне пористой вставки, горелочное устройство с такой вставкой и предварительным смешением называют горелкой с по-

верхностной стабилизацией. В связи с широким применением этих горелок в коммунально-бытовом хозяйстве и промышленности во многих исследованиях предпринимались попытки создать такое горелочное устройство из различных пористых материалов, чтобы обеспечить стабильное горение предварительно перемешанной топливной смеси. Благодаря принципу стабилизации горения будут определены критерии для сжигания предварительно перемешанной смеси (например, обеспечен ее минимальный расход) в пористых средах [1–4]. Критический диаметр пор – основной па-

раметр при расчете и проектировании горелок с пористыми вставками с предварительным смешением топлива. Его рассчитывают с помощью безразмерного модифицированного числа Пекле для пористой среды:

$$Pe = \frac{v_1 d_p c_p \rho}{k}, \quad (1)$$

где v_1 – скорость ламинарного пламени, м/с; d_p – средний диаметр пор пористой матрицы, м; c_p – удельная теплоемкость газовой смеси, Дж/(кг · К); ρ – плотность газовой смеси, кг/м³; k – теплопроводность газовой смеси, Вт/(м · К).

Процесс горения можно стабилизировать путем изменения диаметра пор при одновременном варьировании числа Пекле в пористой матрице. Результаты экспериментальных исследований горелочного устройства с пористой вставкой при предварительном смешении топлива [5] показали, что максимальная температура горения и направление распространения пламени зависят от коэффициента эквивалентности. В [6] разработано несколько горелочных устройств с использованием двух разных пористых материалов: муллита, легированного цирконием, и композита, состоящего из циркониевого корунда, стабилизированного оксидом иттрия. В горелке с применением первого материала пламя находилось на границе зон с разной пористостью во всех режимах горения, а при выборе второго материала пламя в горелке распространялось вверх по потоку через границу этих зон.

Экспериментальная установка для исследования горелок с пористыми вставками [7] была усовершенствована в работе [8] для обеспечения возможности использовать керосин в качестве жидкого топлива. Установлено, что при улучшении процесса предварительного перемешивания топлива и воздуха путем закрутки потока последнего уменьшается уровень выбросов вредных веществ. Этот показатель также зависел от размера пор и толщины пористой вставки.

В [9] было изучено горение смеси синтез-газа, метана и водорода в пористой среде и определено влияние состава смеси на уровень выбросов вредных веществ. Обнаружено, что увеличение содержания H_2/CO в топливной смеси приводит к снижению выбросов NO_x и CO .

В [10] экспериментально исследованы зависимость коэффициента конверсии NO_x и содержания связанного азота от скорости течения топливной смеси и коэффициента эквивалентности при сжигании в пористой среде смеси сжатого природного газа и воздуха. Установлено, что при более низкой скорости потока степень конверсии NO_x и содержание связанного азота повышаются. Результаты численного анализа процесса горения

предварительно перемешанных метана и газа в двумерной пористой матрице, для описания которого использовалась система многоступенчатых реакций, показали, что пламя, возникающее в первой секции пористой области, более стабильно и структурировано, что обуславливает более низкие выбросы вредных веществ по сравнению с пламенем, появившимся во второй секции пористой области [11].

Новый метод стабилизации пламени [12] заключается в сжигании предварительно подготовленной воздушно-метановой смеси при высоких температуре и давлении в горелке с неоднородной пористой вставкой из инертного материала. Скорость пламени – основной параметр, ограничивающий его устойчивость. Согласно результатам экспериментальных исследований, при разном соотношении компонентов смеси обратный просок пламени в горелку не наблюдался. По сравнению с метаном, который имеет довольно высокий нижний предел воспламеняемости в пористой среде, у сжиженных нефтяных газов допустимый диапазон изменения режимных параметров при сжигании в пористой матрице был более широким. Выбросы CO при горении сжиженного нефтяного газа в пористой среде были меньше, чем в открытом пламени, но выше, чем при сжигании метана в пористой среде с таким же коэффициентом эквивалентности [13].

Коэффициент избытка воздуха оказывал существенное влияние на уровень выбросов вредных веществ и максимальную температуру пламени [14]. Исследование стабильности пламени и характеристик процесса горения *n*-гептана в горелочном устройстве среднего размера с пористой вставкой при переменных условиях на входе [15] показало, что при росте температуры поверхности пористой вставки выше температуры кипения топлива длина пламени увеличивается, что ведет к образованию большего количества сажи. При проведении опытов по сжиганию с помощью горелки с пористой вставкой топливной смеси, предварительно перемешанной с *n*-гептаном при давлении 20 МПа [16], было установлено, что выбросы NO_x и CO не превышают 5 и 20 ppm соответственно.

Результаты экспериментальных исследований горения обедненной смеси пропана и воздуха в двухсекционной горелке с пористой вставкой [17] подтвердили низкие уровни выбросов NO_x и CO , обусловленные полным сгоранием топливной смеси. Существует шесть различных режимов сжигания предварительно перемешанной смеси (от обедненной до стехиометрической) в горелочном устройстве с пористой вставкой [18]: высота пламени над ней зависит от диаметра гранул, являющихся частью пористой вставки, и диаметра подводящего трубопровода горелочного устройства.

Большинство публикаций, в которых представлены результаты экспериментальных и численных исследований, посвящено разработке горелочных устройств с пористой вставкой, предназначенных для сжигания предварительно перемешанного топлива, при том что на практике системы горения функционируют в диффузионном режиме. Тем не менее, некоторые исследователи попытались разработать новый подход к расчету и проектированию систем диффузионного сжигания смеси в пористой среде. Авторы [19] предложили модель распространения пламени в плотном слое при условии образования топливной смеси в плоском слое небольшой толщины. Результаты их расчета согласуются с экспериментальными данными. Площадь пламени в плотном слое увеличивается при более высоком числе Рейнольдса и уменьшается при росте средней пористости слоя. Кроме того, предлагаемая диффузионная модель позволяет рассчитать высоту пламени в плотном слое. Параметрическое численное исследование двумерного горения предварительно не перемешанной смеси в устройстве с пористой вставкой [20], выполненное по многокомпонентной двухтемпературной модели, показало, что пламя в рассматриваемых условиях при низких коэффициентах эквивалентности более стабильно.

В работе [21] представлены результаты экспериментального и теоретического исследования формы диффузионного пламени, образующегося при горении предварительно не перемешанной смеси топлив в плоскопараллельном канале, заполненном плотным слоем. Модель появления пламени в тонком слое позволяет точно оценить влияние отношения полуширины канала к диаметру сферических частиц, из которых состоит слой, и числа Рейнольдса на форму и размеры пламени в рассматриваемом плоскопараллельном плотном слое.

Пламя, образующееся при сжигании предварительно не перемешанной смеси в горелке с пористой вставкой и вращающимся завихрителем, экспериментально изучено в работе [22]. Результаты опытов свидетельствуют о возрастании радиационного теплового потока в 5.7 раза в горелке с оптимизированным зазором между фланцем трубчатого корпуса и пористой вставкой при высоком коэффициенте закрутки потока. Увеличение интенсивности перемешивания топлива и воздуха привело к существенному уменьшению объемов выбросов CO и несгоревших углеводородов при уровне выбросов NO_x не более 10 ppm.

Применение специальной пористой секции в системе регенеративного термического окислителя для промышленной медеплавильной печи мощностью 125 кВт [23] позволило сократить расход топлива примерно на 30% и значительно

снизить выбросы NO_x по сравнению со стандартной системой регенеративного термического окисления.

Проблема, возникающая при использовании диффузионных горелочных устройств с пористым наполнителем, заключается в обеспечении эффективного перемешивания воздуха и топлива в пористой вставке непосредственно перед воспламенением горючей смеси. Технология диффузионного горения с обратным пламенем позволяет решить эту проблему. Отличительная особенность этой технологии состоит в том, что она обладает параметрами сжигания, характерными как для предварительно перемешанной, так и для неперемешанной смеси. С учетом этого обстоятельство была предложена технология ID-PC. Экспериментально определены размеры пламени и уровни выбросов NO_x и CO для горелочного устройства, созданного на основе этой технологии, зависят от толщины пористой вставки и плотности распределения пор. Кроме того, получены данные о влиянии числа Рейнольдса струи воздуха на характеристики пламени и уровень выбросов CO и NO_x для IDPC.

РАЗРАБОТКА И КОНСТРУКЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Центральная воздушная струя при диффузионном горении с обратным пламенем имеет больший импульс, чем окружающая ее струя топлива. Поэтому струя воздуха захватывает струю топлива. В результате улучшается перемешивание топлива и воздуха (относительно диффузионного сжигания). При течении жидкости через пористую среду диспергирование может происходить более интенсивно, чем только при диффузии. При высокой скорости течения жидкости в каналах пористой среды диффузия “не успевает” привести к выравниванию концентраций потоков воздуха и топлива в пористой среде, поскольку время пребывания в ней жидкости оказывается недостаточным [24]. С учетом этого обстоятельства разработано такое диффузионное горелочное устройство с обратным пламенем, конструкция которого обеспечивает одинаковые скорости струй воздуха и топлива на входе в пористый участок. Коэффициент эквивалентности можно определить как

$$\phi = \frac{(\dot{m}_{air}/\dot{m}_{fuel})_{stoich.}}{(\dot{m}_{air}/\dot{m}_{fuel})_{actual}}, \quad (2)$$

где $(\dot{m}_{air}/\dot{m}_{fuel})_{stoich.}$, $(\dot{m}_{air}/\dot{m}_{fuel})_{actual}$ — отношения массовых расходов воздуха и топлива при стехиометрических и фактических условиях соответственно.

Стехиометрическое соотношение для любого топлива можно обозначить как $(\dot{m}_{air}/\dot{m}_{fuel})_{stoich} = \varphi_{fuel}$, а соотношение воздух/топливо при фактических условиях будет равно

$$(\dot{m}_{air}/\dot{m}_{fuel})_{actual} = \frac{\rho_{air} A_{air} v_{air}}{\rho_{fuel} A_{fuel} v_{fuel}}, \quad (3)$$

где ρ_{air} , ρ_{fuel} – плотность потока воздуха и топлива, кг/м³; A_{air} , A_{fuel} – площадь поперечного сечения потока воздуха и топлива, м²; v_{air} , v_{fuel} – скорость потока воздуха и топлива, м/с.

Если скорости струй топлива и воздуха равны на входе в пористую зону горелочного устройства с обратным диффузионным пламенем, формулу (3) можно записать в виде

$$(\dot{m}_{air}/\dot{m}_{fuel})_{actual} = \frac{\rho_{air} A_{air}}{\rho_{fuel} A_{fuel}}. \quad (4)$$

С учетом этого выражение (2) можно представить в виде

$$\varphi = \frac{\rho_{fuel} A_{fuel}}{\rho_{air} A_{air}}. \quad (5)$$

Для соосного горелочного устройства квадратного сечения отношение площадей будет равно

$$\frac{A_{air}}{A_{fuel}} = \frac{D_{air}^2}{N_{fuel} D_{fuel}^2}, \quad (6)$$

где D_{air} – диаметр струи воздуха, м; N_{fuel} – количество струй топлива; D_{fuel} – диаметр струи топлива, м.

На рис. 1 показано диффузионное горелочное устройство с обратным пламенем, состоящее из двух стальных труб с концентрическим переходом квадратного сечения, и приведены геометрические размеры пористой вставки. Внутренняя (центральная) труба (внутренний диаметр 20 мм), изготовленная из нержавеющей стали 304 толщиной 1 мм, имеет Г-образную форму. Она находится внутри внешней трубы квадратного сечения, также выполненной из нержавеющей стали. Вместе обе трубы образуют коаксиальное горелочное устройство. Эквивалентный внутренний диаметр внешней трубы равен 40 мм, толщина стенки – 2 мм. По центральной трубе воздух поступает в пористую вставку. Диаметр струи воздуха фиксирован для поддержания требуемых скоростей струй топлива и воздуха на входе в пористую вставку. Струя топлива делится на несколько струй примерно одинакового, но меньшего диаметра. Для этого используется квадратная пластина из нержавеющей стали толщиной 3 мм, в центре которой расположено квадратное отверстие

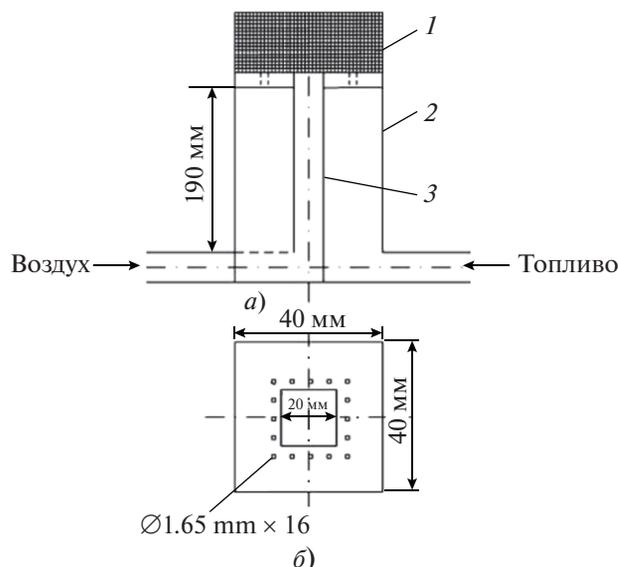


Рис. 1. Диффузионное горелочное устройство с пористой вставкой.
a – схема IDPC (вид спереди); *б* – квадратная пластина из нержавеющей стали с пористой вставкой (вид сверху).
 1 – пористая вставка; 2 – труба внешняя; 3 – труба внутренняя

стие эквивалентным диаметром 20 мм. Диаметр струи топлива (метана) рассчитывается по формулам (4)–(6) при стехиометрических условиях. Количество квадратных отверстий (16) и их эквивалентный диаметр для создания струй топлива указаны на рис. 1.

Внешние оболочки корпуса для пористой вставки разной высоты также изготовлены из нержавеющей стали 304 и имеют толщину 2 мм. Для создания пористой среды использовались неструктурированные пенокерамические блоки 40 × 40 × 14 мм квадратного сечения, выполненные из карбида кремния, с разной плотностью распределения пор (рис. 2). Толщину пористой вставки изменяли путем установки дополнительных пенокерамических блоков. Пористость обоих блоков, определенная по методике из работы [25], составляла 0.86.

Схема экспериментальной установки, разработанной для исследования диффузионных горелочных устройств с пористой вставкой с обратным пламенем, представлена на рис. 3. С помощью центробежной воздуходувки 1 воздух подавался на вход горелочного устройства 13 по специальной линии. Управление расходом воздуха осуществлялось посредством регулируемого электропривода воздуходувки, расход воздуха в линии подачи измерялся градуированным воздушным расходомером (TSI 4040 Н). В качестве топлива использовался чистый метан, который подавался из баллонов 10 на вход горелочного устройства. Для регулиро-

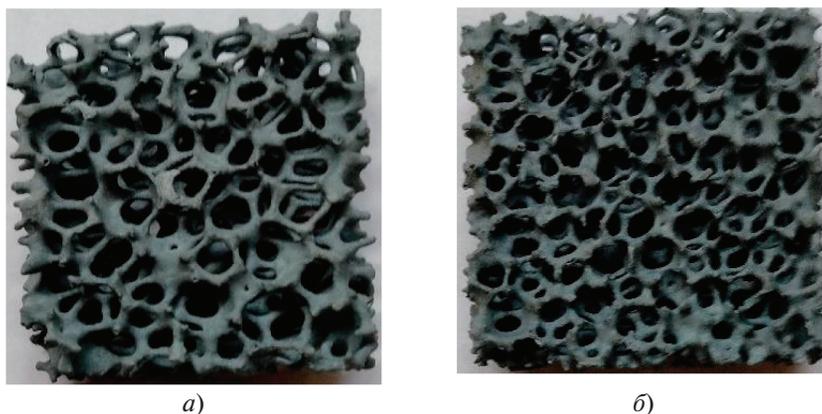


Рис. 2. Неструктурированные пенокерамические блоки из карбида кремния. Плотность распределения пор, PPI: *a* – 10; *б* – 20

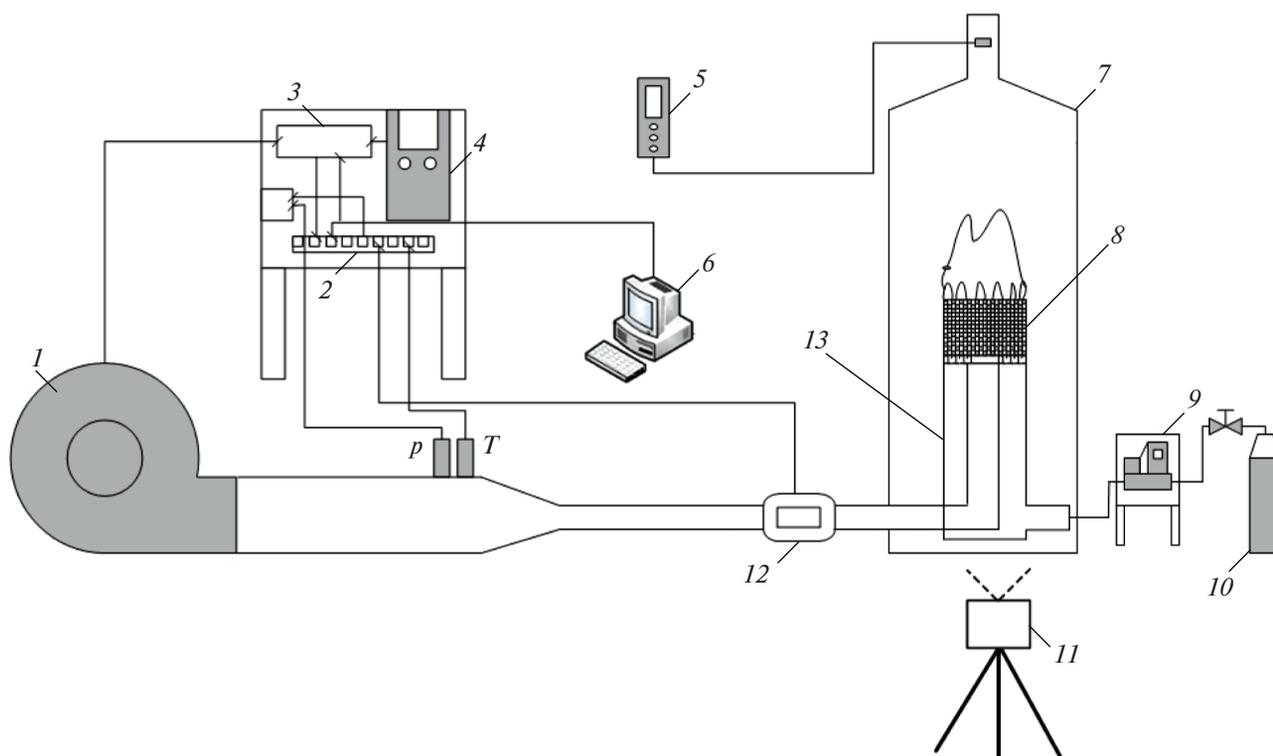


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для исследования IDPC.

1 – воздуходувка; *2* – панель системы SCADA; *3* – панель управления; *4* – регулируемый электропривод; *5* – анализатор дымовых газов; *6* – компьютер; *7* – кожух; *8* – пористая вставка; *9* – регулятор массового расхода топлива; *10* – баллон с топливным газом; *11* – цифровая камера; *12* – массовый расходомер; *13* – коаксиальное горелочное устройство

вания и измерения расхода топлива в подводящей линии применяли отградуированный регулятор 9 (ALICATE MCR-50SLPM-D-D89). Кожух 7 (750 × 750 × 1000 мм) обеспечивал защиту от воздействия наружного воздуха во время испытаний горелочного устройства. Структура пламени контролировалась через стеклянное окно в передней стенке кожуха. Анализатор дымовых газов (Testo 340) использовался для измерения выбросов NO_x

и CO. Видеосъемка пламени в горелочном устройстве, выполнявшаяся для выявления его особенностей и контроля формы, проводилась с помощью цифровой зеркальной камеры со сменным объективом Canon EOS 1300D 11. С помощью специального программного обеспечения видеозаписи пламени в горелочном устройстве преобразовывались в кадры высокого разрешения. Для определения высоты видимого пламени

Данные о расходе топлива и воздуха при исследовании IDPC

Re_{air}	Расход, ст. л/мин	
	Воздуха	Топлива
7445	132	14.37
8122	144	15.69
8798	156	16.99
9475	168	18.30

Примечание. Ст. л/мин – стандартный литр в минуту.

эти неподвижные изображения были дополнительно проанализированы с применением программного обеспечения ImageJ.

В настоящем исследовании скорости струй воздуха и топлива на входе в пористую вставку должны быть равны для лучшего их перемешивания и получения равномерной топливовоздушной смеси. Во всех режимах характеристики пламени в исследуемом горелочном устройстве зависят только от количества воздуха в пористой вставке. Скорость центральной воздушной струи рассчитывают по массовому расходу воздуха. В свою очередь, скорость воздушной струи определяется безразмерным числом Рейнольдса Re_{air} , которое вычисляют по эквивалентному внутреннему диаметру центральной трубы квадратного сечения и свойствам воздуха при 30°C. В таблице указаны расходы воздуха и топлива, а также значения Re_{air} , которые использовались при всех исследованных высотах пористой вставки и плотности распределения пор. Влияние толщины пористой вставки и структурной плотности пор на форму пламени, высоту его видимой части и уровень выбросов CO и NO_x при изменении числа Re_{air} рассмотрено далее.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Экспериментальные исследования пламени в диффузионном горелочном устройстве с пористой вставкой с обратным пламенем проведены при различных геометрических и расходных параметрах устройства. Регистрировались высота пламени, его внешний вид и объем выбросов вредных веществ.

Вид пламени в диффузионном горелочном устройстве с обратным пламенем

Скорость струй воздуха и топлива, плотность распределения пор в пенокерамической вставке, а также толщина этой вставки влияют на структуру пламени в исследуемом горелочном устройстве. Зная характеристики пламени, можно получить качественную информацию о химических

реакциях, протекающих на различных этапах процесса горения. В настоящей работе внешний вид пламени в IDPC регистрировался при коэффициенте эквивалентности, равном 1, с помощью цифровой зеркальной камеры Canon EOS 1300D. Исследовалось также влияние на внешний вид пламени высоты пористой вставки при разных Re_{air} . Для этого использовались неструктурированные пенокерамические блоки из карбида кремния с плотностью распределения пор 10 и 20 PPI.

Толщина пористой вставки описывается с помощью безразмерной высоты W^* , которая определяется отношением фактической высоты пористой вставки к эквивалентному внутреннему диаметру внешней трубы квадратного сечения, изготовленной из нержавеющей стали и используемой в исследуемом горелочном устройстве. Значение W^* варьируется от 0 до 1.05 с шагом 0.35.

На рис. 4 показана структура пламени в IDPC. В нижней его части находится ярко-голубой подслои. У основания горелочного устройства пламя имеет волнистую структуру, возникающую при

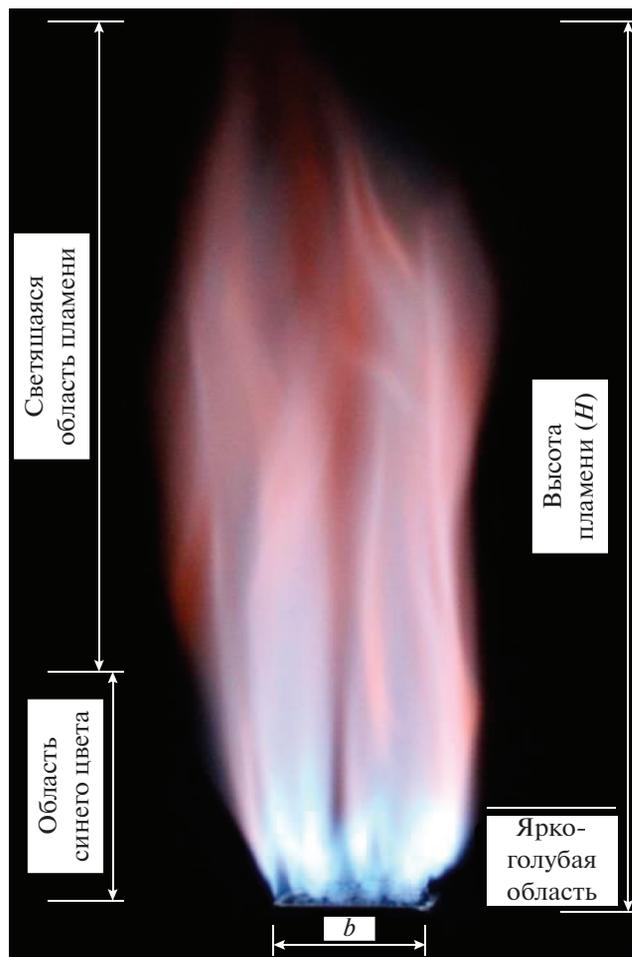


Рис. 4. Структура пламени в IDPC

горении топливовоздушной смеси, проходящей через мелкие поры пенокерамической вставки. Структура пламени стандартного диффузионного горелочного устройства с обратным пламенем состоит из двух частей – факела и основания (b – ширина горелки), которые соединяются узкой перемычкой [26], тогда как факел и основание пламени в диффузионном горелочном устройстве с пористой вставкой образуют единую структуру. Единственным их различием является цвет: синий – у основания, фиолетово-оранжевый – у внешней части факела.

На рис. 5 показано влияние безразмерной высоты W^* на вид пламени при всех Re_{air} и плотности распределения пор 10 PPI. При $W^* = 0$, т.е. при отсутствии пористой вставки в горелочном устройстве, характерное обратное диффузионное пламя наблюдается при всех Re_{air} (см. рис. 5, *a, d, u, n*). Хотя скорости струй топлива и струи воздуха на выходе из коаксиального горелочного устройства квадратного сечения одинаковы, импульс центральной струи воздуха не равен импульсу струек топлива. Значительное количество топлива уносится к центральной струе воздуха, вызывая диффузионный режим горения с обратным пламенем. При увеличении Re_{air} от 7445 до 9475 расход топлива также возрастает для поддержания одинаковых скоростей струй топлива и воздуха. Цвет факела меняется от оранжевого до оранжево-синего. Это свидетельствует об интенсификации смещения частиц топлива с центральной высокоскоростной струей воздуха, что обуславливает более высокое качество сжигания топлива.

При $W^* = 0.35$ и плотности распределения пор 10 PPI пламя приобретает V-образную форму и его цвет становится синим практически по всему объему (см. рис. 5, *b, e, k, o*). При $W^* = 0.35$ струи топлива и центральная струя воздуха распространяются в поперечном направлении через многочисленные микропоры пенокерамической вставки. Это способствует более эффективному перемешиванию топлива и воздуха и дисперсии топливовоздушной смеси в радиальном направлении. Поэтому ярко-голубая зона наблюдается в корне пламени при всех Re_{air} . При увеличении Re_{air} от 7445 до 9475 при постоянном значении $W^* = 0.35$ высота пористой вставки оказывается недостаточной для “компенсации” отрицательного влияния более высокого импульса центральной струи воздуха. Под действием большого импульса струи воздуха ярко-голубая зона горения сдвигается вверх из центральной части. Из-за повышенного импульса топливовоздушной смеси зона горения смещается и расширяется над ярко-голубой частью пламени. При этом наблюдается более интенсивное распространение зоны горе-

ния в осевом направлении по сравнению с радиальным направлением.

При увеличении W^* от 0.35 до 0.70 при 10 PPI ярко-голубая зона пламени приобретает коническую форму, а светящаяся зона сохраняет постоянную ширину, но ее вершина становится конической формы (см. рис. 5, *v, ж, л, n*). Безразмерная высота $W^* = 0.70$ достаточна для обеспечения требуемой скорости диффузии топлива и воздуха в пористой вставке при 10 PPI. Степень перемешивания струй топлива и воздуха возрастает из-за увеличения радиального импульса смеси, обуславливая наибольшую длину ярко-голубой зоны среди всех исследованных режимов.

По цвету пламени в диффузионном горелочном устройстве с пористой вставкой можно определить фактические условия горения топлива в разных осевых точках. При $W^* = 1.05$ и плотности распределения пор 10 PPI центральная струя воздуха, имеющая повышенный импульс, гасит пламя в центральной зоне (см. рис. 5, *г, з, м, р*) – в результате наблюдаются два пламени. Так как пламя разделилось на две части, на выходе уже отсутствует цельное пламя с однородной структурой. Таким образом, дальнейший рост W^* повлечет за собой ухудшение эксплуатационных характеристик исследуемого горелочного устройства. При увеличении Re_{air} от 7445 до 9475 ярко-голубая область растягивается в осевом направлении и становится соизмеримой с высотой пламени.

Изменение цвета пламени в IDPC наглядно показывает влияние плотности распределения пор на его внешний вид и форму. При возрастании плотности распределения пор с 10 до 20 PPI при постоянной пористости количество пор удваивается, а их диаметр уменьшается. Влияние дисперсии в пористой вставке при 20 PPI становится более существенным, чем при 10 PPI, вследствие увеличения гидравлического сопротивления в осевом направлении, вызванного ростом количества пор. Для поддержания при 20 PPI расходов воздуха и топлива таких же, как и при 10 PPI, горючая смесь должна выходить из пористой вставки с относительно высокой скоростью. Это приводит к увеличению импульса потока при 20 PPI. При возрастании относительной высоты пористой вставки свыше $W^* = 0.70$ из-за увеличенного осевого импульса топливовоздушной смеси происходит срыв пламени.

На рис. 6 представлены различные типы пламени в IDPC при изменении W^* от 0 до 0.70 для разных чисел Re_{air} . При $W^* = 0.35$ и плотности распределения пор 20 PPI (см. рис. 6, *б, d, з, л*) ярко-голубая зона пламени более вытянута в осевом направлении по сравнению с режимом, наблюдаемым при 10 PPI, из-за более высокого импульса центральной струи. Вершина пламени имеет ярко-

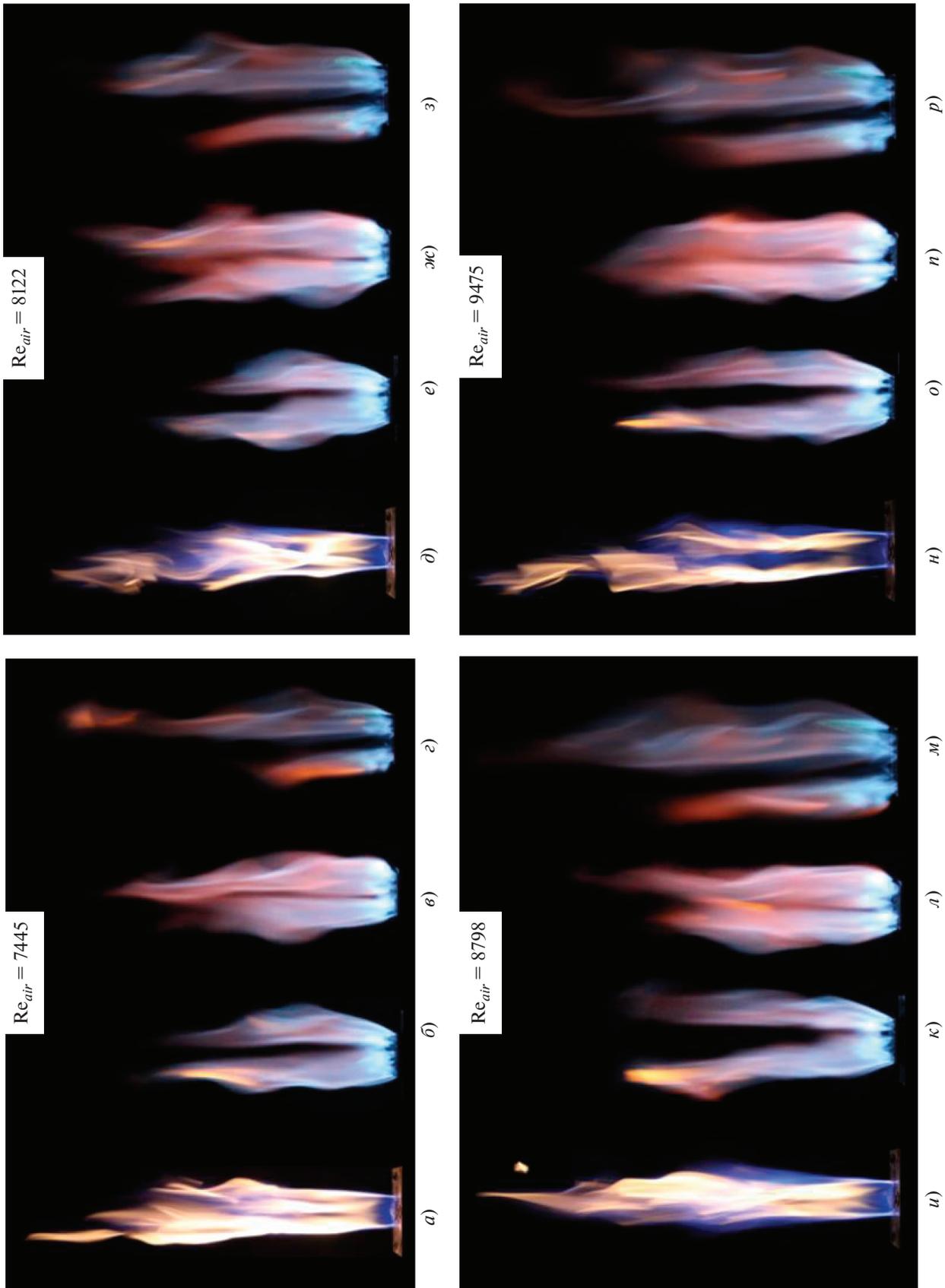


Рис. 5. Влияние W^* на вид пламени в ИДРС при плотности пор 10 PPI.
 W^* : а, д, и, н — 0; б, е, к, о — 0.35; в, ж, л, п — 0.70; з, з, м, р — 1.05

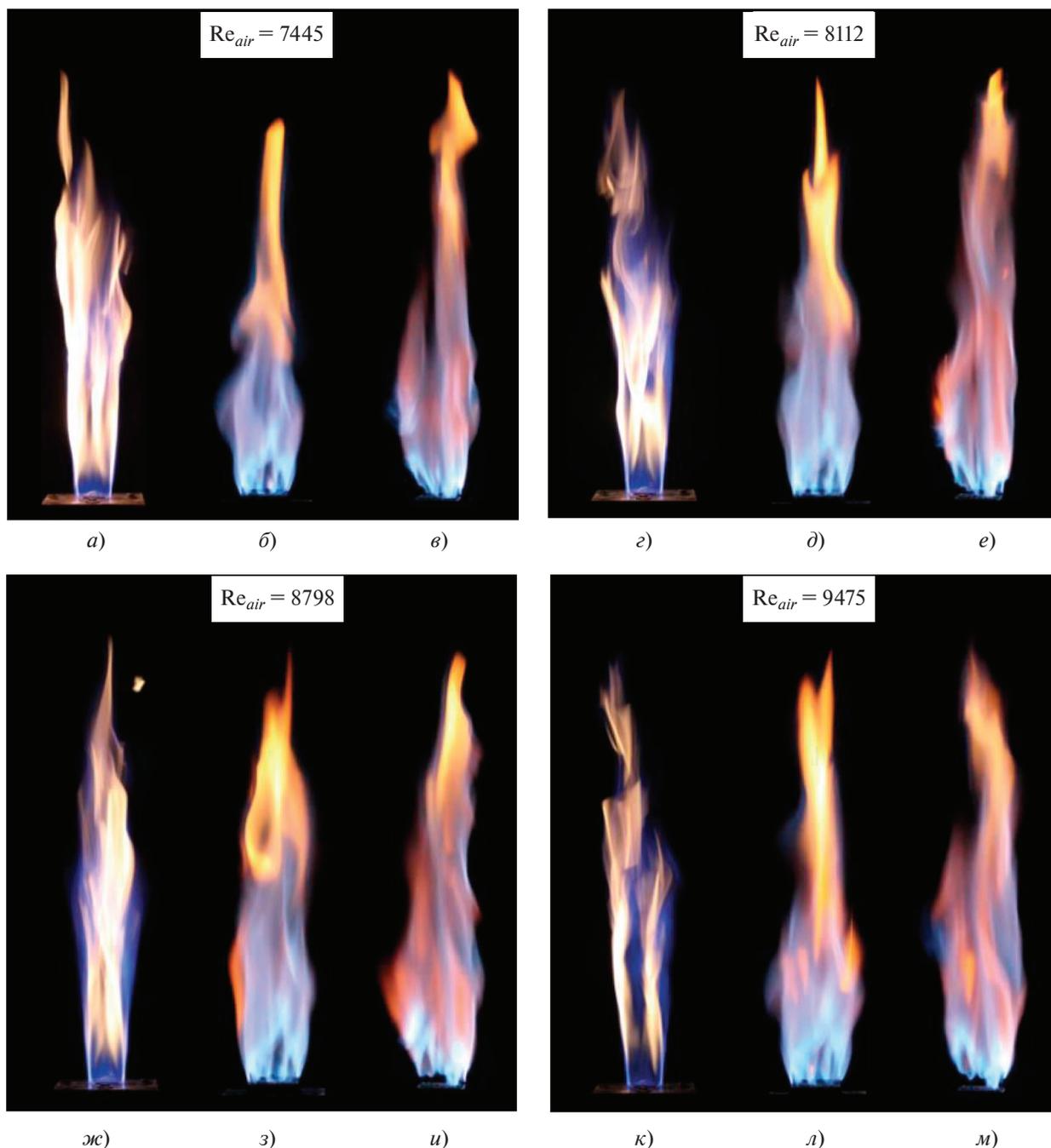


Рис. 6. Влияние W^* на вид пламени в IDPC при плотности пор 20 PPI.
 W^* : а, г, ж, к – 0; б, д, з, л – 0.35; в, е, и, м – 0.70

желтый цвет для всех чисел Re_{air} при $W^* = 0.35$ и плотности распределения пор 20 PPI. Дальнейшее изменение Re_{air} от 7445 до 9475 при 20 PPI способствует росту импульса центральной воздушной струи. В результате большая часть топлива сжигается в диффузионном режиме, который распространяется на светящуюся часть пламени по направлению к ярко-голубой зоне. Увеличение W^* от 0.35 до 0.70 при 20 PPI и постоянном

Re_{air} приводит к практически полному выходу пламени в IDPC из пористой вставки и расширению светящейся области от вершины пламени до его основания (см. рис. б, в, е, и, м). При плотности распределения пор 20 PPI ярко-желтая область пламени расширяется от его вершины до факела при увеличении Re_{air} и W^* . Такой цвет пламени свидетельствует об образовании сажи. При 20 PPI возрастает вероятность отрыва пламе-

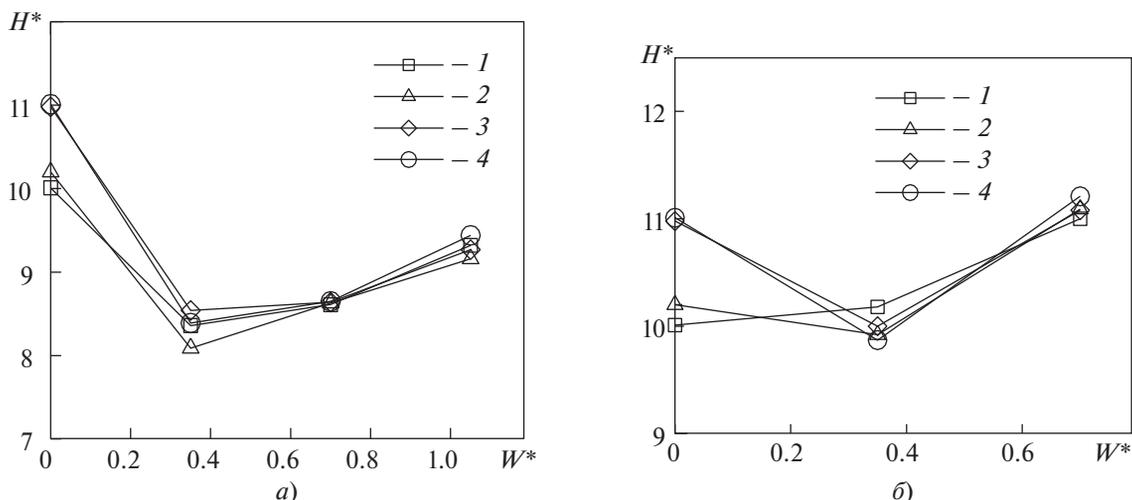


Рис. 7. Влияние W^* на нормированную высоту пламени H^* в IDPC при плотности распределения пор 10 PPI (а) и 20 PPI (б).
 Re_{air} : 1 – 7445; 2 – 8122; 3 – 8798; 4 – 9475

ни (по сравнению со вставкой, имеющей плотность распределения пор 10 PPI) вследствие увеличения импульса топливоздушной струи.

Высота пламени в IDPC

Высота пламени в горелочном устройстве свидетельствует в основном о его физических размерах, а также дает качественную информацию об особенностях сгорания топливоздушной смеси. Расстояние от выхода из горелочного устройства до вершины видимой части пламени называется нормальной высотой пламени. В настоящем исследовании пористая вставка устанавливалась сверху на выходе из горелочного устройства. В результате высота пламени измерялась от входа в пористую вставку до вершины пламени. Фактически фиксировалась осредненная по времени высота в разных режимах. Для определения этого параметра было сделано более 400 фотографий пламени, которые затем были наложены одна на другую с помощью программного обеспечения ImageJ для обработки изображений, которое также позволило получить среднюю интенсивность цветных фотоснимков с представлением цветов по RGB-модели. Высота пламени измерялась от входа в пористую вставку до точки с наименьшей интенсивностью RGB-изображения. Фактическая высота пламени нормировалась по ширине IDPC. На рис. 7 показаны зависимости нормированной высоты пламени H^* от W^* , Re_{air} и плотности распределения пор.

При $W^* = 0$ сжигание топлива происходило только в обратном диффузионном режиме. В этом случае незначительное количество топлива сгорает в основании пламени в режиме предварительного смещения, тогда как основная часть

топлива сгорает при диффузионном режиме. Это приводит к увеличению осевой длины реакционной области и максимальной высоты пламени при всех Re_{air} . Изменение W^* от 0.35 до 1.05 при 10 PPI способствует резкому уменьшению высоты H^* – примерно на 7–24% в зависимости от значения Re_{air} (если сравнивать со сжиганием топлива без пористой вставки). После установки пористой вставки время пребывания топлива и воздуха внутри “оболочки” пламени увеличивается, а из-за влияния дисперсии в радиальном направлении сгорает большее количество топливоздушной смеси, чем в осевом направлении. Линейное увеличение высоты пористой вставки способствует росту H^* , так как этот параметр учитывается при оценке H^* .

Изменение плотности распределения пор с 10 до 20 PPI при постоянной высоте пористой вставки и Re_{air} вначале приводит к незначительному уменьшению H^* , а затем к его увеличению по сравнению с режимом без пористой вставки. Этот эффект обусловлен главным образом смещением пламени вверх, характерным для сжигания при $W^* = 0.70$ и плотности распределения пор 20 PPI.

Выбросы вредных веществ при работе IDPC

Выбросы CO и NO_x измеряли с помощью анализатора дымовых газов (Testo 340) при постоянной высоте пористой вставки и плотности распределения пор и разных значениях Re_{air} . При увеличении безразмерной высоты пористой вставки W^* свыше 0.70 наблюдаются погасание пламени и его срыв. Поэтому при $W^* > 0.70$ выбросы не измерялись. На рис. 8 показана зависи-

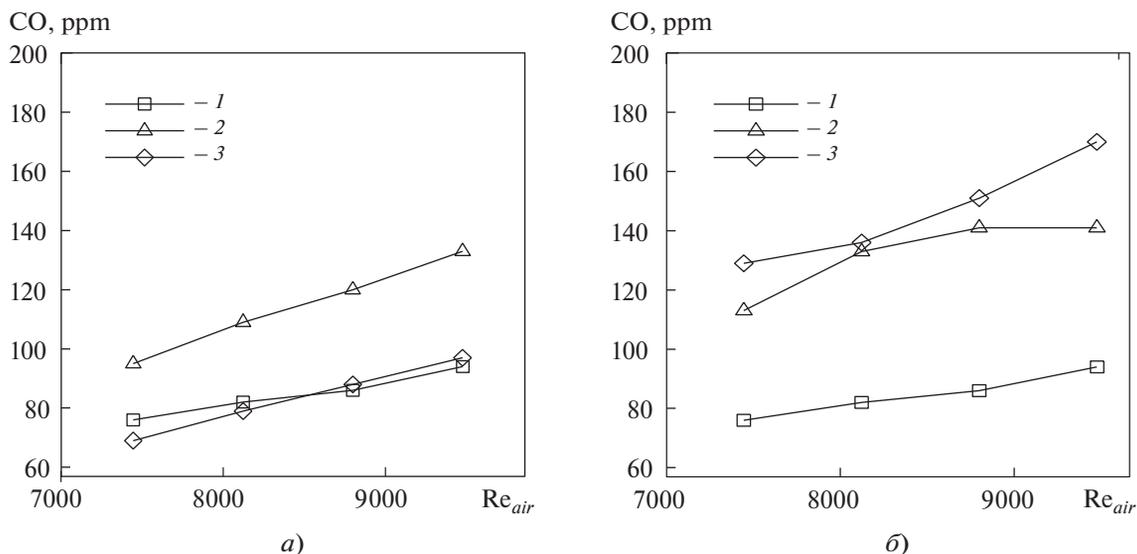


Рис. 8. Зависимость выбросов CO от Re_{air} при плотности распределения пор 10 PPI (а) и 20 PPI (б). W^* : 1 – 0; 2 – 0.35; 3 – 0.70

мость выбросов CO от Re_{air} и W^* при плотности распределения пор 10 и 20 PPI. При увеличении Re_{air} выбросы CO возрастают практически линейно при постоянных W^* и плотности распределения пор. Увеличение Re_{air} при неизменной W^* также приводит к повышению расхода топлива для поддержания одинаковых скоростей струй топлива и воздуха на входе в IDPC. Таким образом, при более высоких значениях Re_{air} выделяется большее количество тепловой энергии, что, в свою очередь, вызывает ускорение потока по всем направлениям. Это ускорение и более высокая скорость топлива и воздуха сокращают время пребывания реагентов в зоне горения. В результате замедляется преобразование CO в CO_2 .

Изменение W^* от 0 до 0.35 способствует резкому росту выбросов CO, а при дальнейшем увеличении W^* наблюдается их снижение. При $W^* = 0.35$ и плотности распределения пор 10 PPI выбросы CO были максимальными для всех Re_{air} . Почти все пламена имеют синий цвет (см. рис. 5, б, е, к, о), который свидетельствует о присутствии в них соединений CH^* (CH^* – промежуточный радикал, образующийся в процессе сгорания метана) и C_2 , обуславливающих повышенные выбросы CO [27]. Дальнейшее увеличение W^* от 0.35 до 0.70 при 10 PPI приводит к изменению цвета светящейся части пламени от синего до фиолетово-оранжевого (см. рис. 5, в, ж, л, и). Выбросы CO уменьшаются вследствие увеличения высоты пористой вставки и более эффективного распределения центральной воздушной струи по всем направлениям.

Сравнивая данные о выбросах CO, можно заметить, что при увеличении плотности распределения пор с 10 PPI до 20 PPI выбросы CO повышаются при одинаковых изменениях Re_{air} и W^* . При 20 PPI у вершины пламени виднеется ярко-желтая область, а факел имеет ярко-голубой цвет при всех сочетаниях W^* и Re_{air} (см. рис. 6). Ярко-голубая зона пламени свидетельствует о наличии в нем соединений CH^* и C_2 , а желтая зона у его вершины – о неполном сгорании топлива. Таким образом, при 10 PPI наблюдаются более высокие выбросы CO.

На рис. 9 показана зависимость выбросов NO_x от Re_{air} и плотности распределения пор при разных W^* . Время пребывания реагирующих веществ внутри оболочки пламени, их температура и состав – основные факторы, влияющие на образование NO_x при сгорании смеси без предварительного смешения [28]. Изменение числа Рейнольдса Re_{air} от 7445 до 8122 при $W^* = 0$ привело к резкому росту выбросов NO_x при $Re_{air} = 8122$. Однако затем выбросы NO_x снижались практически линейно, хотя значение Re_{air} возросло до 9475.

Резкое увеличение выбросов NO_x при $Re_{air} = 8122$ вызвано расширением синей зоны пламени, имеющей высокую температуру, и последующим снижением температуры из-за небольшого времени пребывания реагирующих веществ внутри оболочки пламени при более высоком массовом расходе смеси.

При $W^* > 0$ уровень выбросов NO_x остается ниже 9 ppm при всех значениях Re_{air} и плотности

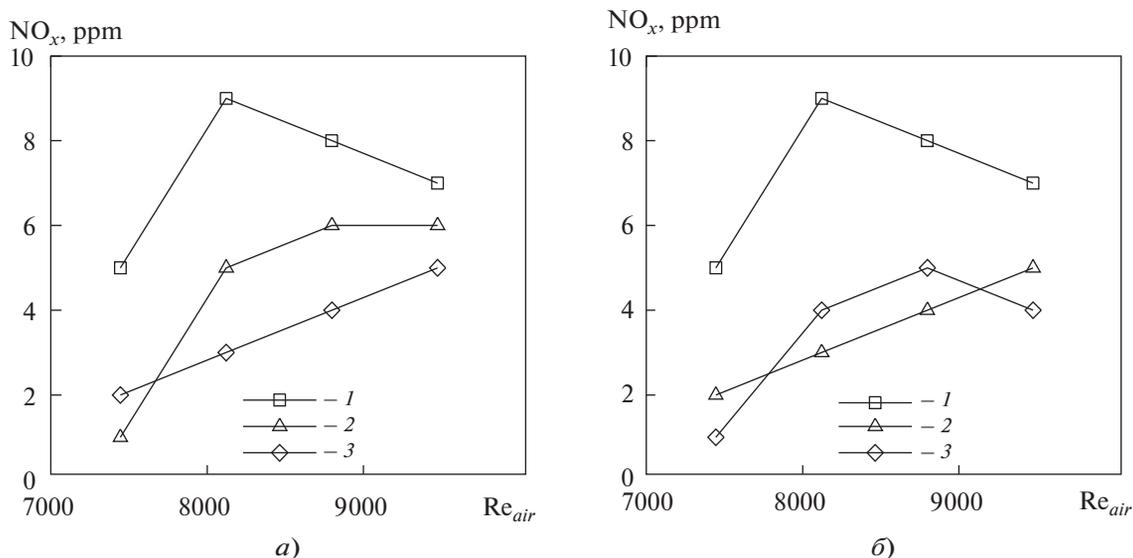


Рис. 9. Зависимость выбросов NO_x от Re_{air} при плотности распределения пор 10 PPI (а) и 20 PPI (б).
Обозначения см. рис. 8

распределения пор. При увеличении выбросов NO_x до 9 ppm механизм образования быстрых оксидов азота является определяющим [29]. Изменение W^* от 0.35 до 0.70 при фиксированном Re_{air} и плотности распределения пор 10 PPI способствует снижению уровня выбросов NO_x. Синяя область видимого пламени имеет меньшие размеры и находится у его основания. Так как в основании находится зона, обогащенная топливом, свободные углеводородные радикалы быстро реагируют с азотом воздуха, в результате чего образуется NO [30].

Обратная закономерность изменения уровня выбросов NO_x наблюдается при 20 PPI. В этом случае синяя область пламени имеет большие размеры, чем при 10 PPI. Уровень выбросов NO_x уменьшается при всех W^* и Re_{air} и значениях плотности распределения пор 10 и 20 PPI, по сравнению с сжиганием смеси без пористой вставки, хотя плотность тепловыделения непрерывно увеличивается.

ВЫВОДЫ

1. Высоту и внешний вид пламени, а также характеристики выбросов вредных веществ, образующихся при работе диффузионного горелочного устройства с пористой вставкой с обратным пламенем определяют при различных физических параметрах пористой вставки и изменении числа Рейнольдса центральной воздушной струи. Зависимость структуры видимого пламени от высоты пористой вставки и плотности распределения пор была проанализирована при стехиометрических условиях.

2. Пористая вставка увеличивает радиальную дисперсию и осевой импульс при постоянном расходе топливовоздушной смеси. При изменении радиального и осевого импульсов течения меняются внешний вид пламени и уровень выбросов вредных веществ.

3. Цвет видимого пламени в IDPC варьируется от ярко-голубого до сине-оранжевого или желто-синего при увеличении высоты пористой вставки, плотности распределения пор и числа Re_{air}.

4. При 10 PPI нормированная высота пламени в IDPC уменьшается.

5. При 10 PPI, $W^* = 0.70$ и Re_{air} = 8122 IDPC имеет самые лучшие эксплуатационные характеристики (по сравнению со всеми другими зарегистрированными режимами): реакционную зону увеличенной ширины, небольшую высоту видимого пламени и низкий уровень выбросов CO и NO_x.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Trimis D.** Verbrennungsvorgänge in porösen inerten Medien. Erlangen: Friedrich-Alexander-University, 1995.
2. **Trimis D., Durst F.** Combustion in a porous medium-advances and applications // Combust. Sci. Technol. 1996. V. 121. Is. 1–6. P. 153–168. <https://doi.org/10.1080/00102209608935592>
3. **The porous burner – concept, technique, and fields of application / F. Durst, A. Kesting, S. Moessbauer, K. Pickenaecker, O. Pickenaecker, D. Trimis // Gas Waerme Int. 1997. Bd. 46. Nr. 6. S. 300–307.**
4. **Durst F., Trimis D.** Combustion by free flames versus combustion reactors // Clean Air. 2002. V. 3. Is. 1. P. 1–20. <https://doi.org/10.180/15614410211844>

5. **Filtration** combustion of a methane wave in air for oxygen-enriched and oxygen-depleted environments / L.A. Kennedy, A.V. Saveliev, J.P. Bingue, A.A. Fridman // *Proc. Combust. Inst.* 2002. V. 29. Is. 1. P. 835–841. [https://doi.org/10.1016/S1540-7489\(02\)80107-9](https://doi.org/10.1016/S1540-7489(02)80107-9)
6. **Mathis W.M., Ellzey J.L.** Flame stabilization, operating range, and emissions for a methane/air porous burner // *Combust. Sci. Technol.* 2003. V. 175. Is. 5. P. 825–839. <https://doi.org/10.1080/00102200302411>
7. **Vijaykant S., Agrawal A.K.** Liquid fuel combustion within silicon-carbide coated carbon foam // *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2007. V. 32. Is. 1. P. 117–125. <https://doi.org/10.1016/J.EXPTHERMFLUSCI.2007.02.006>
8. **Kaplan M., Hall M.J.** The combustion of liquid fuels within a porous media radiant burner // *Exp. Therm. Fluid Sci.* 1995. V. 11. Is. 1. P. 13–20. [https://doi.org/10.1016/0894-1777\(94\)00106-1](https://doi.org/10.1016/0894-1777(94)00106-1)
9. **Alavandi S.K., Agrawal A.K.** Experimental study of combustion of hydrogen-syngas/methane fuel mixtures in a porous burner // *Int. J. Hydrogen Energy.* 2008. V. 33. Is. 4. P. 1407–1415. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2007.12.005>
10. **Afsharvahid S., Ashman P.J., Dally B.B.** Investigation of NO_x conversion characteristics in a porous medium // *Combust. Flame.* 2008. V. 152. Is. 4. P. 604–615. <https://doi.org/10.1016/J.COMBUSTFLAME.2007.06.017>
11. **Bidi M., Nobari M.R.H., Avval M.S.** A numerical evaluation of combustion in porous media by EGM (Entropy Generation Minimization) // *Energy.* 2010. V. 35. Is. 8. P. 3483–3500. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2010.04.053>
12. **Adiabatic** premixed combustion in a gaseous fuel porous inert media under high pressure and temperature: Novel flame stabilization technique / A. Bakry, A. Al-Salaymeh, A.H. Al-Muhtaseb, A. Abu-Jrai, D. Trimis // *Fuel.* 2011. V. 90. Is. 2. P. 647–658. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2010.09.050>
13. **Panigrahy S., Mishra S.C.** Analysis of combustion of liquefied petroleum gas in a porous radiant burner // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2016. V. 95. P. 488–498. <https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2015.12.017>
14. **Hoda S.N., Nassab S.A.G., Ebrahim J.J.** Three dimensional numerical simulation of combustion and heat transfer in porous radiant burners // *Int. J. Therm. Sci.* 2019. V. 145. P. 106024. <https://doi.org/10.1016/J.IJTHEMALSCI.2019.106024>
15. **Flame** stability and combustion characteristics of liquid fuel in a meso-scale burner with porous media / X. Chen, J. Li, M. Feng, D. Zhao, B. Shi, N. Wang // *Fuel.* 2019. V. 251. P. 249–259. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2019.04.011>
16. **Experimental** investigation of lean premixed pre-vaporized liquid-fuel combustion in porous media burners at elevated pressures up to 20 bar / S. Sobhani, J. Legg, D. F. Bartz, J.J. Kojima, C.T. Chang, J.D. Sullivan, J.P. Moder, M. Ihme // *Combust. Flame.* 2020. V. 212. P. 123–134. <https://doi.org/10.1016/J.COMBUSTFLAME.2019.10.033>
17. **Experimental** investigation of flame stability in the premixed propane-air combustion in two-section porous media burner / V. Bubnovich, H. Hernandez, M. Toledo, C. Flores // *Fuel.* 2021. V. 291. P. 120117. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.120117>
18. **Wake** flow and flame characteristics in the porous media with different surface combustion states: An experimental study / S. Shaoyi, S. Zhao, S. Junrui, C. Zhongshan, Z. Yanzhi, J. Linsong, Z. Yang, Q. Haotian, X. Maozhao // *Chem. Eng. Sci.* 2022. V. 257. P. 117677. <https://doi.org/10.1016/J.CES.2022.117677>
19. **Kamiuto K., Ogawa T.** Diffusion flames in cylindrical packed beds // *J. Thermophys. Heat Transfer.* 2012. V. 11. No. 4. P. 585–587. <https://doi.org/10.2514/2.6284>
20. **Modeling** of diffusion filtration combustion radiative burner / K.V. Dobrego, I.M. Kozlov, S.A. Zhdanok, N.N. Gnesdilov // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2001. V. 44. Is. 17. P. 3265–3272. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(00\)00343-4](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(00)00343-4)
21. **Kamiuto K., Miyamoto S.** Diffusion flames in plane-parallel packed beds // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2004. V. 47. Is. 21. P. 4593–4599. <https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2003.08.032>
22. **Kamal M.M., Mohamad A.A.** Enhanced radiation output from foam burners operating with a nonpremixed flame // *Combust. Flame.* 2005. V. 140. Is. 3. P. 233–248. <https://doi.org/10.1016/J.COMBUSTFLAME.2004.12.001>
23. **Development** of non-premixed porous inserted regenerative thermal oxidizer / J.-C. Zhang, L.-M. Cheng, C.-H. Zheng, Z.-Y. Luo, M.-J. Ni // *J. Zhejiang University: Sci. A.* 2013. V. 14. Is. 9. P. 671–678. <https://doi.org/10.1631/jzus.A1300198>
24. **Perkins T.K., Johnston O.C.** A review of diffusion and dispersion in porous media // *Soc. Petroleum Eng. J.* 1963. V. 3. Is. 1. P. 70–84. <https://doi.org/10.2118/480-PA>
25. **Richardson J.T., Peng Y., Remue D.** Properties of ceramic foam catalyst supports: pressure drop // *Appl. Catalysis A: General.* 2002. V. 204. Is. 1. P. 19–32. [https://doi.org/10.1016/S0926-860X\(00\)00508-1](https://doi.org/10.1016/S0926-860X(00)00508-1)
26. **Effects** of nozzle length on flame and emission behaviors of multi-fuel-jet inverse diffusion flame burner / H.S. Zhen, Y.S. Choy, C.W. Leung, C.S. Cheung // *Appl. Energy.* 2011. V. 88. Is. 9. P. 2917–2924. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2011.02.040>
27. **Ikeda Y., Kojima J., Hashimoto H.** Local chemiluminescence spectra measurements in a high-pressure laminar methane/air premixed flame // *Proc. Combust. Inst.* 2002. V. 29. Is. 2. P. 1495–1501. [https://doi.org/10.1016/S1540-7489\(02\)80183-3](https://doi.org/10.1016/S1540-7489(02)80183-3)
28. **Turns S.R.** An introduction to combustion: concepts and applications. 3rd ed. McGraw Hill: Mechanical Engineering Series, 2012.
29. **Moreno F.E., Pam R.L., Chirolo D.S.** Theory and application of ultra low NO_x radiant combustion: sub-9 ppm without SCR // *Proc. of the Intern. Gas Research Conf. Orlando, Florida, USA, 16–19 Nov. 1992.* P. 2353–2363.
30. **Fenimore C.P.** Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames // *Symp. (Int.) Combust.* 1971. V. 13. Is. 1. P. 373–380. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(71\)80040-1](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(71)80040-1)

Experimental Investigation on Effect of Height and Pore Density of Porous Medium on Flame and Emission Characteristics of Inverse Diffusion Combustor

A. Dekhatawala^a, P. V. Bhale^a, and R. Shah^{a, *}

^a Department of Mechanical Engineering, Sardar Vallabhbhai National Institute of Technology, Surat, Gujarat, 395007 India

*e-mail: rds@med.svnit.ac.in

Abstract—The flame structure, appearance, and emission characteristics of an inverse diffusion porous combustor (IDPC) are investigated experimentally. Unstructured ceramic foam made of silicon carbide (SiC) is used as a porous medium. At stoichiometry conditions, a reactive analysis is performed with methane as a fuel and variations in the pore distribution density (pore density) of ceramic foam SiC. Height of ceramic foam and Reynolds number of air jet (Re_{air}) are varied. Porous medium alters flow momentum in radial and axial directions which affects flame appearance and emissions. Increased radial momentum produces wider and shorter flame in case of IDPC. A bright blue zone is detected at the base of the flame, and a luminous orange or orange-blue zone is observed in the post-combustion zone near the flame tip. As the pore density is enhanced from 10 pores per inch (PPI) to 20 PPI, the flame is detached from the surface of the porous medium at a higher Reynolds number of the air jet. The visible flame height of IDPC is significantly reduced at 10 PPI when compared to a case without a porous medium. The Reynolds number of the air jet and the pore density of the porous medium strongly influence the emission levels of NO_x and CO. The IDPC with porous media height of 28 mm, $Re_{air} = 8122$ and 10 PPI pore density performs optimum in terms of flame shapes and CO and NO_x emissions

Keywords: flame structure, porous medium combustion, flame height, inverse diffusion porous combustor, silicon carbide, combustible mixture, flow momentum in radial and axial directions, CO and NO_x emission level