

ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ИНВЕРСНОГО ДИФФУЗИОННОГО ПЛАМЕНИ В ГОРЕЛКЕ С ОБРАТНЫМ УСТУПОМ И ЗАГЛУБЛЕННОЙ СООСНОЙ ГОРЕЛКЕ

С. Махеш, Д. П. Мишра

Лаборатория горения, Факультет аэрокосмической техники, Индийский технологический институт
208016 Канпур, Индия, mishra@iitk.ac.in

Исследовано турбулентное инверсное диффузионное пламя в заглубленной соосной горелке и горелке с обратным уступом. Изучение проводилось на основе видимой формы пламени, его длины, устойчивости, распределений температуры и концентрации кислорода вдоль осевой линии, а также эмиссии NO_x . Показано, что горелка с обратным уступом дает компактную форму пламени с меньшим свечением при более высоком соотношении скоростей воздуха и топлива, а также несколько лучшие тепловые характеристики и немного меньшие выбросы NO_x , чем заглубленная соосная горелка. Несколько выше в горелке с обратным уступом и концентрация кислорода вдоль осевой линии из-за большего вовлечения окружающего воздуха. Более низкий предел устойчивости пламени в горелке с обратным уступом по сравнению с соосной можно объяснить более интенсивным перемешиванием воздуха и топлива.

Ключевые слова: инверсное диффузионное пламя, горелка с обратным уступом, заглубленная соосная горелка, глобальная скорость деформации.

ВВЕДЕНИЕ

Большинство используемых на практике систем горения работают в режиме диффузионного пламени, характеризующегося большей устойчивостью, надежностью и более широким рабочим диапазоном по сравнению с предельно перемешанными пламенами. Согласно наблюдениям инверсное диффузионное пламя (ИДП), специальный вид перемешанного пламени, производит меньше сажи, чем нормальные диффузионные пламена. Инверсное диффузионное пламя можно организовать в простой соосной горелке, окружив высокоскоростную струю воздуха низкоскоростной струей топлива. Различие импульсов струй обеспечивает лучшее вовлечение топлива центральной струей воздуха и усиленное перемешивание воздуха и топлива по сравнению с нормальными диффузионными пламенами. Влияние отношения скоростей воздуха и топлива на характеристики ИДП описано в работах [1–6]. В [1] экспериментально и численно изучалось ламинарное метановое инверсное диффузионное пламя, стабилизированное на соосной горелке.

Обнаружены шесть режимов пламени, различающиеся внешним видом, скоростями воздуха и топлива, а также температурой и концентрациями компонентов. В работе [3] исследовалось влияние температуры пламени, структуры и концентрации топлива на формирование сажи в ламинарных инверсных диффузионных пламенах метана, пропана, этилена и бутана. Показано, что разбавление топлива инертными газами оказывает сильное влияние на формирование сажи, в то время как структура пламени играет второстепенную роль. Сравнительное исследование [2] водородных инверсного и нормального диффузионных пламен выявило более высокую температуру в вершине инверсного пламени, что было объяснено более высоким отношением для H_2 и большей избыточной энтальпией в центральной области. В работе [6] численно проанализировано влияние поля течения воздушно-топливных струй на образование сажи в ламинарных метановых инверсном и нормальном диффузионных пламенах: меньшая пиковая объемная доля сажи наблюдалась в инверсном пламени. В экспериментах [4] с турбулентным метановым ИДП, стабилизированным на соосных горелках с переменными диаметрами трубок, установлено, что геометрия сопла и отношение скоростей

S. Mahesh, D. P. Mishra.

Combustion Laboratory, Department of Aerospace Engineering, Indian Institute of Technology, Kanpur-208016, India.

воздуха и топлива влияют на видимую длину пламени, распределение температуры и устойчивость. В экспериментах [7, 8] измеряли высоту несветящейся зоны ламинарного соосного метанового и этиленового ИДП при постоянной скорости топлива и переменных скоростях воздуха. Для визуализации зоны реакции по излучению радикала ОН использовали метод PLIF (плоское свечение, индуцированное лазером), а пиковую интенсивность свечения измеряли камерой ICCD (intensified charged coupled device). Найдено, что высота несветящейся зоны ИДП увеличивалась с ростом скорости центральной струи воздуха. Для более точного расчета высоты несветящейся зоны ламинарного ИДП была модифицирована формула Ропера. В экспериментах [5] исследовали ИДП сжиженного нефтяного газа и воздуха, стабилизированное на двух различных горелках, соосной и с портами, устроенными по окружности. Описана форма пламени, определены его видимая длина, температурный контур, концентрация кислорода на осевой линии и индекс эмиссии NO_x . В горелке с портами по окружности наблюдалось усиленное перемешивание воздуха и топлива по сравнению с соосной. В [9] были исследованы внешний вид турбулентного ИДП сжиженного нефтяного газа, видимая высота пламени, его устойчивость и характеристики излучения в горелке с обратным уступом; введен новый параметр для корреляции доли длины, свободной от сажи, в турбулентных ИДП. В работах [10, 11] проведены измерения характеристик сажи в случае горения разбавленного этилена. Использовали индуцированное лазером свечение полициклического ароматического углеводорода, метод ОН-LIF, а также рассеянное лазерное излучение. Обнаружено, что радиальные распределения полициклических ароматических углеводородов и сажи качественно аналогичны полученным в нормальном диффузионном пламени. На рост сажи в ИДП этилена, разбавленного азотом, оказывали влияние длина пламени и температура.

Главная цель настоящей работы — сравнительное исследование характеристик турбулентных инверсных диффузионных пламен, формируемых горелками с обратным уступом и заглубленной соосной: внешнего вида и видимой длины пламени, распределений температуры и концентрации кислорода вдоль осевой линии, а также эмиссии NO_x при различных соотношениях скоростей воздуха и топлива.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схемы исследуемых горелок с отношением выходных площадей 1.8 показаны на рис. 1. Детали горелки с обратным уступом и экспериментальной установки подробно изложены в работе [9]. Заглубленная соосная горелка сконструирована так, что внутренняя трубка погружена на глубину $\delta = 4$ мм, как показано на рис. 1, для улучшения предварительного перемешивания кольцевой струи топлива с центральной струей воздуха. Расходы воздуха и топлива измеряли калиброванными ротаметрами. Пламя фотографировали ССD-камерой, которая способна снимать 21 изображение с интервалом 0.5 с. Для оценки видимой длины пламени использовали программное обеспечение для обработки изображений ImageJ, включающее в себя такие методы, как сглаживание, «обострение» и обнаружение краев для точной идентификации вершины пламени. Топливом служил сжиженный нефтяной газ, содержащий 69 % C_3H_8 и 30 % C_4H_{10} и другие незначительные газовые примеси. Сжатый воздух пропускали через силикагель для удаления влаги. Распределение температуры вдоль оси измеряли термопарой R-типа (Pt 13 % Rh–Pt с диаметром проволоки 0.23 мм). Спаи термопары покрыты керамикой во избежание каталитических эффектов. Данные о температуре получены с помощью DAQ-PCI 6281 с частотой выборки 60. Среднюю температуру газа на осевой линии определяли как среднее значение данных, полученных в 1000 точках положения пламени, измеренную температуру пламени корректировали на потери на излучение. Для извлечения горячих газов из выхлопа с це-

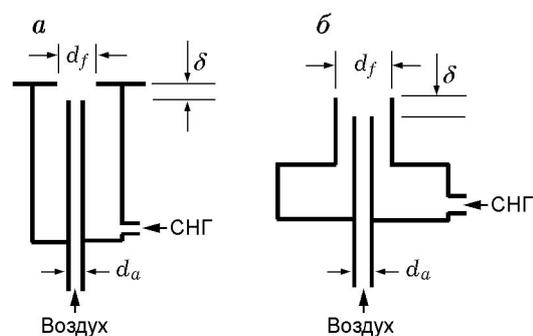


Рис. 1. Схемы горелок: с обратным уступом [9] (а) и соосной (б) (СНГ — сжиженный нефтяной газ)

лю измерения эмиссии NO_x использовали пробоотборник диаметром 3 мм и хемилюминесцентный анализатор. В настоящем исследовании обе горелки были размещены внутри стеклянного резервуара, чтобы избежать внешних возмущений от окружающей среды [9]. Часть выхлопа направлялась в ручной анализатор горения KM900 для измерения концентраций CO , CO_2 и O_2 , необходимых для вычисления индекса эмиссии NO_x .

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Внешний вид пламени

На качественном уровне влияние геометрии горелки и соотношения скоростей воздуха и топлива на форму пламени и свечение можно обнаружить из прямой визуализации пламени. В настоящем исследовании визуальные наблюдения пламени выполнены при средней скорости струи топлива $v_f = 0.28$ м/с в некотором диапазоне выходной скорости воздушной струи v_a (рис. 2). Отчетливо выделяются две зоны: предварительного перемешивания (цвет голубой) и свечения (цвет желтый). В горелке с обратным уступом по сравнению с соосной нижняя часть пламени имеет интенсивный голубой цвет при $v_a = 5.65$ м/с (см. рис. 2, а–г), а зона шейки вблизи основания пламени не наблюдается, возможно, из-за наличия препятствия. Размер пламени в горелке с обратным уступом уже (см. рис. 2, а–г). Отчетливо видны и нижняя голубая зона, и верхняя зона свечения пламени при $v_a = 5.65$ м/с. При этой же скорости струи воздуха в соосной горелке протяженность голубой зоны очень мала, видимо, в пламени преобладают эффекты плавучести. При увеличении скорости центральной струи воздуха в горелке с обратным уступом наблюдается изменение цвета верхней зоны свечения ИДП от желтого к пурпурному (рис. 2, в, г), что объясняется усиленным предварительным перемешиванием топлива и воздуха. Изменение цвета ясно указывает на присутствие меньшего количества сажи в пламени горелки с обратным уступом при более высоких скоростях воздушной струи. Хотя соотношение импульсов струй способствует перемешиванию топлива и воздуха, основную роль в изменении гидродинамики играет геометрия горелки с обратным уступом, благодаря которой низкоскоростная струя топлива вовлекается в высокоскоростную, что усиливает предварительное перемешивание. Зона

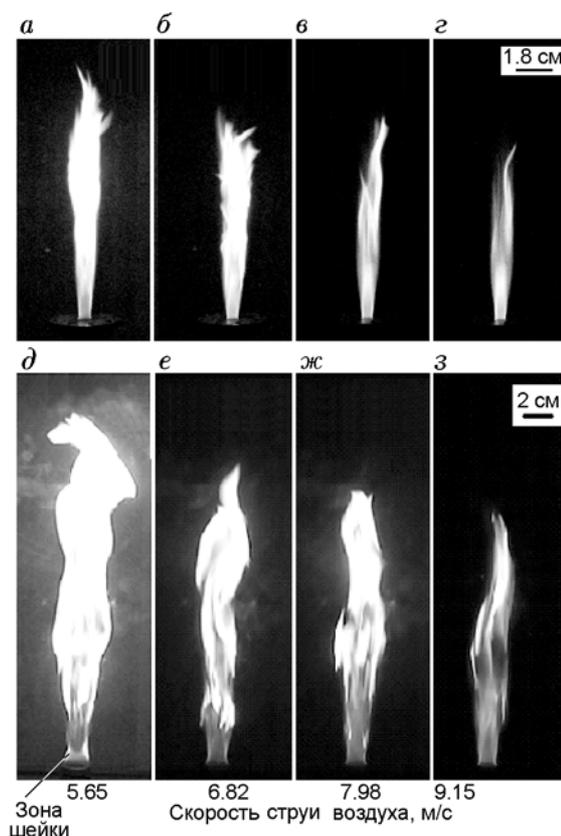


Рис. 2. Внешний вид ИДП в горелке с обратным уступом [9] (а–г) и соосной горелке (д–з) при $v_f = 0.28$ м/с

свечения в пламени соосной горелки не меняется на пурпурный цвет при более высоких скоростях воздушной струи (рис. 2, д–з).

2.2. Длина пламени

Важным параметром, помогающим качественно оценить влияние геометрии горелки на перемешивание воздуха и топлива, является длина пламени H_f . Она может помочь при оптимизации геометрии горелки и, в частности, при оценивании длины камеры сгорания. В настоящем исследовании проведено сравнение видимых длин пламен (нормированных на диаметр топливной трубки d_f) горелок с обратным уступом и соосной при скоростях струи топлива $v_f = 0.28, 0.4$ и 0.56 м/с и скоростях струи воздуха $v_a = 5.65 \div 10.32$ м/с (рис. 3). Поскольку относительная скорость струй воздуха и топлива управляет структурой ИДП [5], изменение видимой длины пламени интерпретируется в терминах глобальной скорости де-

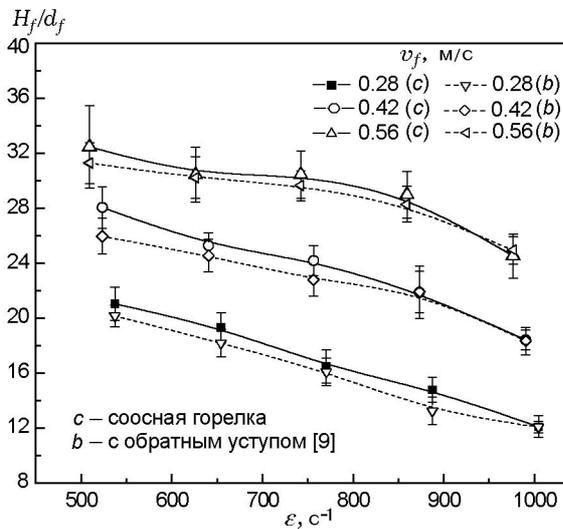


Рис. 3. Изменение длины пламени в зависимости от глобальной скорости деформирования в горелке с обратным уступом [9] и соосной горелке

формирования ϵ , которая определяется как отношение разности скоростей воздуха и топлива на выходе из горелки ($v_a - v_f$) к диаметру трубки для воздушной струи (d_a). Так как импульс центральной струи воздуха играет основную роль в высоте пламени турбулентного ИДП при фиксированной скорости топливной струи, относительная скорость нормируется на диаметр центральной трубки d_a , а не на диаметр топливной трубки d_f .

Тенденция к убыванию видимой длины пламени с увеличением глобальной скорости деформирования ϵ наблюдается для обеих горелок (см. рис. 3). Причиной этого может быть высокая относительная разность скоростей воздуха и топлива на выходе из горелки, способствующая усилению их перемешивания. Можно заметить, что в одном и том же диапазоне скоростей воздуха длина пламени увеличивается с ростом скорости топливной струи, что можно объяснить недостаточным вовлечением топлива в центральную струю воздуха. В результате некоторое количество топлива, не захваченное центральной струей воздуха, может вовлекать внешний воздух и гореть в верхней части пламени. В горелке с обратным уступом длина пламени уменьшается на $4 \div 10\%$ при $v_f = 0.28$ м/с, однако при $v_f = 0.42$ и 0.56 м/с уменьшение становится незначительным по сравнению с соосной горелкой (см. рис. 3). Кроме заглубления

центральной трубки, этому, возможно, способствует фланцевая пластина, установленная на выходе горелки с обратным уступом. В настоящем исследовании найдено, что в обеих горелках скорость воздушной струи в диапазоне $v_a = 5.65 \div 10.32$ м/с эффективно снижает длину пламени только при $v_f = 0.28$ м/с. В указанном диапазоне скоростей v_a наблюдается максимальное уменьшение видимой длины пламени — на 34.3 и 29.7% соответственно в горелках с обратным уступом и соосной.

2.3. Температура пламени

Для того чтобы лучше понять структуру пламени, измеряли температуру газа ИДП вдоль осевой линии ($\langle T_c \rangle$) в обеих горелках при $v_f = 0.28$ м/с и $v_a = 6.82$ м/с. Температура заметно различалась в голубой зоне пламени (рис. 4). На расстоянии $Z = 0.5$ см над поверхностью горелки температура ($\langle T_c \rangle$) в горелке с обратным уступом была на 200 К выше, чем в соосной. Это объясняется усиленным вовлечением топлива и его перемешиванием с воздухом вблизи основания пламени, обусловленным геометрией горелки и отношением импульсов струй воздуха и топлива. Интересно отметить, что температура газа на осевой линии, наблюдавшаяся в горелке с обратным уступом на расстоянии $Z = 0.5$ см, в соосной горелке достигается только при $Z = 3.5$ см. Более медленный рост температуры газа на осевой линии в последнем случае вызван недостаточно эффек-

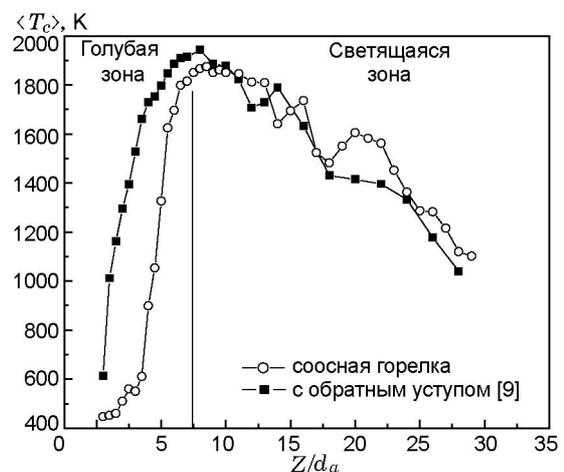


Рис. 4. Распределение температуры вдоль осевой линии ИДП в горелке с обратным уступом [9] и соосной горелке при $v_f = 0.28$ м/с и $v_a = 6.82$ м/с

тивным перемешиванием. Более того, температура пламени в горелке с обратным уступом круто увеличивается от основания пламени к вершине голубой зоны, в то время как в соосной горелке температура растет постепенно до $Z = 3.5$ см, а затем в диапазоне $Z = 4 \div 8$ см изменяется более резко. Пиковая температура пламени горелки с обратным уступом вблизи вершины голубой зоны примерно на 70 К выше, чем в соосной. Однако осцилляции пламени в светящейся зоне преобладают в соосной горелке вследствие плавучести, вызывающей мерцание пламени. Найдено, что температура пламени в светящейся зоне убывает в результате свечения сажи и тепловых потерь в окружающий воздух. Хотя в горелке с обратным уступом температура в светящейся зоне пламени более высокая, влияние геометрии горелки заметно только во внутренней голубой зоне. Аналогичное поведение температуры газа на осевой линии наблюдалось в работах [1, 4, 5] в случае соосной горелки.

2.4. Устойчивость пламени

Устойчивость инверсного диффузионного пламени в обеих горелках исследовали путем варьирования скорости воздушной струи при фиксированных скоростях топливной струи в диапазоне $v_f = 0.28 \div 0.85$ м/с. На рис. 5 видно, что скорость срыва $v_{blowoff}$ возрастает с увеличением скорости топливной струи в пламенах обеих горелок, что может быть вызвано неэффективностью вовлечения центральной

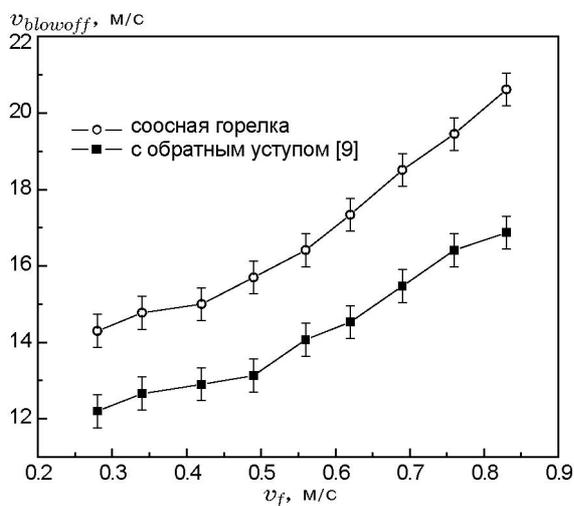


Рис. 5. Пределы срыва ИДП в горелке с обратным уступом [9] и соосной горелке

струей воздуха возросшего расхода топлива. В результате вместе с топливом вовлекается некоторое количество окружающего воздуха и рассеивается в направлении центрального потока газа, образуя диффузионное пламя. Это увеличивает высоту светящейся зоны и делает пламя диффузионно-контролируемым. Найдено, что скорость срыва пламени в горелке с обратным уступом на $17 \div 31$ % ниже, чем в соосной, при всех скоростях струи топлива. Ранний срыв пламени горелки с обратным уступом вызван возросшей глобальной скоростью деформирования ϵ вблизи среза горелки, что приводит к более интенсивному предварительному перемешиванию топлива и воздуха вблизи основания пламени. Вовлечение окружающего воздуха высокоскоростной воздушной струей вблизи среза горелки разбавляет область предварительного перемешивания. В результате отношение топливо/воздух становится бедным в основании пламени, что приводит к срыву пламени. В случае соосной горелки низкий уровень предварительного перемешивания топлива и воздуха вблизи среза горелки делает пламя устойчивым и, следовательно, требуется более высокая скорость воздушной струи для срыва пламени.

2.5. Концентрация кислорода вдоль осевой линии

Протяженность области перемешивания воздуха и топлива качественно характеризуется распределением концентрации кислорода вдоль осевой линии при $v_f = 0.28$ м/с и $v_a = 6.82$ м/с в обеих горелках. На рис. 6 видно, что средняя концентрация кислорода уменьшается быстрее в голубой зоне пламени обеих горелок вследствие усиленного перемешивания струй топлива и воздуха. Минимальный уровень концентрации достигается приблизительно на вершине голубой зоны. Аналогичная картина наблюдалась в работе [5]. Однако средняя концентрация кислорода вдоль осевой линии не намного выше в случае горелки с обратным уступом по сравнению с соосной. Была сделана попытка объяснить это наблюдение. В горелке с обратным уступом струя топлива легко вовлекается в центральную область воздушной струи благодаря конфигурации течения за обратным уступом. В соосной горелке струя топлива создает медленно движущуюся завесу вокруг центральной струи воздуха. Это препятствует вовлечению в нее окружающего воздуха

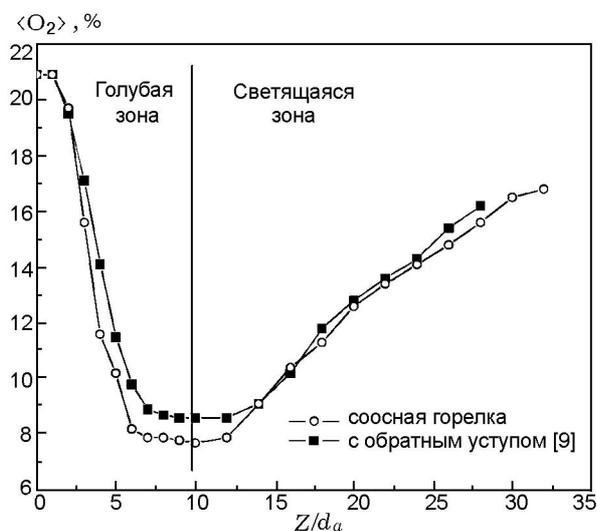


Рис. 6. Изменение средней концентрации кислорода вдоль осевой линии в горелке с обратным уступом [9] и заглубленной соосной горелке при $v_f = 0.28$ м/с и $v_a = 6.82$ м/с

и тем самым несколько снижает среднюю концентрацию кислорода вдоль осевой линии.

2.6. Эмиссия NO_x

Пробы отбирали на удвоенной видимой высоте пламени, чтобы обеспечить отбор, соответствующий предложенному в [12]. Очевидно, что максимальный индекс эмиссии NO_x ($EINO_x$) получается при эквивалентном соотношении $\phi = 1.1$ в обеих горелках (рис. 7). Однако найдено, что значение $EINO_x$ убывает в бедной и богатой топливом смесях. Увеличение $EINO_x$ в почти стехиометрических условиях можно объяснить увеличением температуры пламени из-за интенсивного предварительного перемешивания, которое усиливает формирование тепловых оксидов NO_x . Так как эффективность предварительного перемешивания топлива и воздуха снижается с увеличением отношения ϕ , инверсное диффузионное пламя преобразуется в нормальное. При одном и том же отношении ϕ значения $EINO_x$ в горелке с обратным уступом ниже, чем в соосной. Причиной этого может быть уменьшение видимой длины пламени в горелке с обратным уступом, что уменьшает время нахождения газов в зоне высокотемпературного пламени, в результате снижается образование NO_x по сравнению с соосной горелкой.

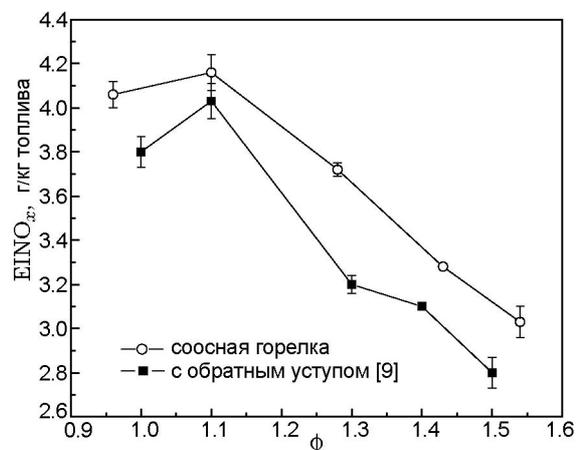


Рис. 7. Изменение $EINO_x$ в зависимости от эквивалентного соотношения в горелке с обратным уступом [9] и соосной горелке

ВЫВОДЫ

Были исследованы внешний вид пламени, длина пламени, его устойчивость, температура вдоль осевой линии и эмиссия NO_x в горелках с обратным уступом [9] и заглубленной соосной. В случае горелки с обратным уступом устанавливаются сравнительно малая длина пламени, несколько лучшие тепловые характеристики, более высокая средняя концентрация кислорода на осевой линии, а также меньшие выбросы NO_x по сравнению с заглубленной соосной горелкой. Причиной этого может быть конфигурация горелки с обратным уступом, которая изменяет гидродинамику струй воздуха и топлива и улучшает их перемешивание. С точки зрения устойчивости инверсное диффузионное пламя в заглубленной соосной горелке имеет более широкий рабочий диапазон, поскольку пламя больше контролируется за счет диффузии по сравнению с горелкой с обратным уступом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wu K. T., Essenhigh R. H. Mapping and structure of inverse diffusion flames of methane // Proc. Combust. Inst. — 1984. — V. 20. — P. 1925–1932.
2. Takagi T., Wu T., Komiyama M. Preferential diffusion effects on the temperature in usual and inverse diffusion flames // Combust. and Flame. — 1996. — V. 106. — P. 252–260.
3. Sidebotham G. W., Glassman I. Flame temperature, fuel structure, and fuel concentration effects on inverse diffusion flames // Combust. and Flame. — 1992. — V. 90. — P. 269–283.

4. **Sobiesiak A., Wenzell J. C.** Characteristics and structure of inverse flame of natural gas // Proc. Combust. Inst. — 2005. — V. 30. — P. 743–749.
5. **Sze L. K., Cheung C. S., Leung C. W.** Appearance, temperature and NO_x emission of two inverse diffusion flames with different port design // Combust. and Flame. — 2006. — V. 144. — P. 237–248.
6. **Kaplan C. R., Kailasanath K.** Flow field effects on soot formation in normal and inverse diffusion flames // Combust. and Flame. — 2001. — V. 124. — P. 275–294.
7. **Mikofski M. A., Williams T. C., Shaddix C. R., Blevins L. G.** Flame height measurement of laminar inverse diffusion flames // Combust. and Flame. — 2006. — V. 146. — P. 63–72.
8. **Mikofski M. A., Williams T. C., Shaddix C. R., Blevins L. G.** Effect of varied air flow on flame structure of laminar inverse diffusion flames // Western States Section / Combust. Inst. — 2004. — P. 04S-7.
9. **Mahesh S., Mishra D. P.** Flame stability and emission characteristics of turbulent LPG IDF in a backstep burner // Fuel. — 2008. — V. 87. — P. 2614–2619.
10. **Lee E. J., Oh K. C., Shin H. D.** Soot formation in inverse diffusion flames of diluted ethene // Fuel. — 2005. — V. 84. — P. 543–550.
11. **Lee E. J., Oh K. C., Shin H. D.** The evolution of incipient soot particles in an inverse diffusion flame of ethene // Combust. and Flame. — 2005. — V. 140, N 3. — P. 249–254.
12. **Driscoll J. F., Ruey Hung Chen, Youngbin Yoon.** Nitric oxide levels of turbulent jet diffusion flames: effect of residence time and damkohler number // Proc. of 27th Intern. Symp. on Combustion. — 1990. — P. 281–288.

*Поступила в редакцию 29/XI 2009 г.,
в окончательном варианте — 3/IX 2010 г.*