

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУЙНОГО ДИФфуЗИОННОГО ПЛАМЕНИ СЖИЖЕННОГО ГАЗА, РАЗБАВЛЕННОГО АЗОТОМ И СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ПЛОХООБТЕКАЕМЫМ ТЕЛОМ

П. Кумар, Д. П. Мишра

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

Описано влияние разбавления азотом и подогрева реагентов на соосное струйное диффузионное пламя сжиженного газа, стабилизированное с помощью плохообтекаемого тела, для двух случаев: подогретый воздух; подогретые воздух и топливо. Результаты экспериментов показали, что при добавлении N_2 в поток топлива длина пламени увеличивается, что объясняется снижением температуры пламени; доля длины пламени, свободная от сажи, также увеличивается, что может быть обусловлено уменьшением концентрации топлива и температуры пламени. С ростом температуры реагентов и толщины кромки плохообтекаемого тела длина пламени, а также доля длины пламени, свободная от сажи, уменьшаются. Найдено, что индекс эмиссии NO_x при добавлении азота сокращается для всех конфигураций горелки, что можно объяснить уменьшением времени пребывания газовой смеси в пламени. При увеличении толщины кромки и температуры реагентов индекс эмиссии NO_x также возрастает соответственно вследствие увеличения времени пребывания и теплового эффекта.

Ключевые слова: подогретые реагенты, разбавление, $EINO_x$, диффузионное пламя, плохообтекаемое тело.

ВВЕДЕНИЕ

Обычно плохообтекаемое тело используется в камерах сгорания в качестве стабилизатора с целью увеличения пределов существования пламени. Оно создает зону рециркуляции, которая способствует перемешиванию топлива и окислителя. Кроме того, зона рециркуляции действует как постоянный источник воспламенения, поскольку в ней содержится некоторое количество радикалов и тепла. Более того, благодаря ей увеличивается время пребывания газов смеси, что повышает устойчивость пламени [1].

Отношение массовых потоков в центре и на периферии кольца является одним из параметров, управляющих стабилизацией турбулентного диффузионного пламени [2]. В работе [3] изучалось влияние плохообтекаемого тела на течение реагирующего потока в осесимметричной камере сгорания. Был сделан вывод, что в случае, когда импульс движения в центральной струе больше, чем в кольцевой струе, центральная струя проникает в рециркуляци-

онную зону и таким образом влияет на ее размер. Хотя отношение скоростей (D_b/D_a , см. рис. 1) является важным параметром характеристики поля течения, оно также может зависеть от степени загромождения сечения канала, скорости струи и т. д. В работе [4] было выполнено численное исследование влияния степени загромождения на перемешивание струи. Утверждалось, что интенсивность циркуляции в следе за плохообтекаемым телом увеличивается с ростом его угла конуса.

Образование сажи зависит не только от типа топлива, но и от процесса перемешивания внутри пламени [5]. В работе [6] изучали влияние перемешивания, количественно характеризуемого локальной скоростью деформации пламени, на образование сажи. Было показано, что локальная концентрация и средний объем сажи уменьшаются с увеличением скорости деформации. Позднее в [7] авторы исследовали влияние числа Дамкеллера на образование NO , измеряя его концентрацию вдоль центральной линии в турбулентном неперемешанном пламени, стабилизированном плохообтекаемым телом, для нескольких составных топлив. Установлено, что NO генерируется либо

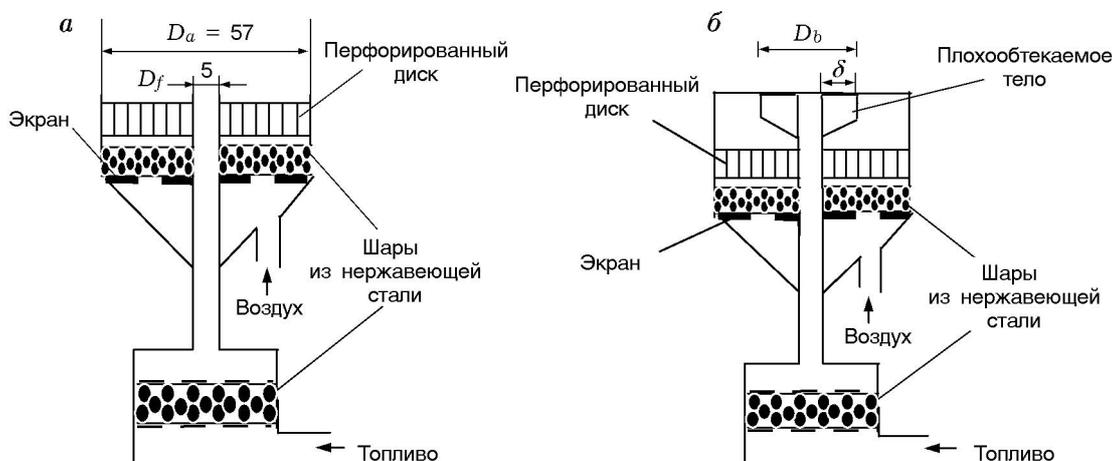


Рис. 1. Схемы соосной (а) и соосной с плохообтекаемым телом (б) горелок

в рециркуляционной зоне, либо ниже по потоку и на его концентрацию также влияет механизм потребления, такой как образование NO для N_2 . В работе [8] при тех же условиях эксперимента изучали влияние скорости струи топлива на структуру рециркуляционной зоны. Повышение скорости центральной струи снижало интенсивность перемешивания во внешнем вихре, который, в свою очередь, сдвигал зону реакции в сторону потока топлива. Структура рециркуляционной зоны и тип топлива влияли на производство NO .

Разработано несколько доступных методов, таких как рециркуляция продуктов сгорания, стадийное горение и мягкое горение, которые можно применять, в частности, для управления выбросами NO_x [9–11]. Кроме того, горение в подогретом воздухе рассматривается в качестве приемлемого метода снижения уровня выбросов при одновременном повышении эффективности горения, что можно использовать в промышленных печах и системах регенеративного горения [12]. В работе [13], где изучалось горение углеводородов в предварительно подогретом воздухе, измеренный уровень выбросов NO_x оказался не столь высоким, как ожидалось, что было объяснено разбавлением топлива или воздуха. В [14] при исследовании характеристик излучения пламени и выбросов NO_x при сжигании C_2H_4 и CH_4 в предварительно сильно подогретом воздухе отмечалось, что слабая эмиссия NO_x сильносажистого пламени в высокотемпературном потоке воздуха была вызвана потерями тепла на излучение.

В работе [15] было показано, что на выход NO_x влияют излучательные характеристики сажистых пламен. В [16] предполагалось, что увеличение температуры газа приведет к снижению периода индукции при образовании сажи и, следовательно, к увеличению выхода сажи. В работе [17] были проведены количественные измерения снижения выхода сажи. Для того чтобы разделить химические и тепловые эффекты, авторы применяли два разбавителя — N_2 и Ar — с различными удельными теплоемкостями при исследовании спутного ламинарного диффузионного пламени. Установлено, что на скорость образования сажи сильно влияет температура, в то время как влияние вида разбавителя незначительно. Впоследствии в работе [18] было показано, что максимальное значение объема сажи в спутных диффузионных пламенах пропорционально концентрации топлива и адиабатической температуре пламени.

Влияние инертного разбавителя, вводимого в потоки воздуха и топлива, на характеристики пламени с предварительно нагретыми реагентами в ламинарном диффузионном пламени CH_4 — воздух изучали в [19]. Было показано, что длина пламени почти не меняется в случае разбавленного топлива, в то время как в случае разбавления воздуха она растет. Наоборот, доля длины пламени, свободная от сажи, увеличивается для потока разбавленного топлива и не меняется в случае разбавленного воздуха. Более того, разбавление в сторону преобладания воздуха приводит к уменьшению

индекса эмиссии NO_x по сравнению с разбавлением в сторону преобладания топлива. Главную причину этого авторы [19] видят в более высокой температуре пламени.

В настоящей работе исследуется влияние добавления N_2 и предварительного прогрева реагентов на характеристики горения струйного диффузионного факела сжиженного газа, стабилизированного плохообтекаемым телом, в терминах длины видимого пламени, доли длины, свободной от сажи, доли на излучение, температуры газа и показателя выбросов NO_x .

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД

Приведем краткое описание экспериментальной установки и процедуры исследования. В настоящих экспериментах используются два типа горелок (рис. 1): соосная и соосная с плохообтекаемым телом [20]. Характеристики плохообтекаемых тел даны в табл. 1.

Для визуализации формы и размеров пламени использовалась цифровая видеокамера высокого разрешения. Поверхность пламени изучали методом обнаружения краев, при этом использовалось программное обеспечение ImageJ. Для каждого частного условия делалась двадцать одна фотография с интервалом

Таблица 1
Характеристики плохообтекаемого тела

№ п/п	δ , мм	D_b , мм	D_b/D_a	δ/D_f
1	0.75	6.5	0.114	0.15
2	3.25	12.8	0.224	0.65
3	6.50	18.1	0.317	1.3

Примечание. δ — толщина кромки, D_a , D_b , D_f — диаметры (см. рис. 1).

2 с, и по этим фотографиям оценивалась средняя длина пламени. Для измерения состава газа отбирали пробы зондом из нержавеющей стали, охлаждавшимся водой.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние добавления N_2 в струю сжиженного газа на длину пламени, долю длины, свободную от сажи, долю радиационных потерь, температуру газа и индекс эмиссии NO_x исследовалось для двух вариантов постановки опытов, условия которых представлены в табл. 2. В обоих случаях поддерживалось постоянство полного объемного расхода потока топлива при добавлении N_2 в сжиженный газ. В случае I воздух предварительно подогревался до 470 К, при этом температура потока топлива сохранялась равной температуре окружающей среды. В случае II температуры воздуха и топлива были постоянными — 470 К.

2.1. Длина пламени

На рис. 2 показано изменение безразмерной длины пламени при изменении молярной доли N_2 в соосном диффузионном пламени струи сжиженного газа с тремя конфигурациями горелки с плохообтекаемым телом.

Предварительно подогретый воздух. При относительной толщине кромки $\delta/D_f = 0.15$ длина пламени (L_f) увеличивается незначительно при добавлении азота (см. рис. 2, a). Изменение составляет около 10 % при варьировании молярной доли азота в диапазоне $X_{\text{N}_2} = 0 \div 0.4$. При $\delta/D_f = 0.65$ и 1.3 длина пламени возрастает примерно на 13 и 19 % соответственно.

Таблица 2
Основные условия на входе при постановке экспериментов

Тип эксперимента	T_f , К	T_a , К	\bar{v}_f , м/с	\bar{v}_a , м/с	Re_f	Re_a
I предварительно подогретый воздух	308	470	0.816	0.033	982 ± 50	30 ± 5
II предварительно подогретые воздух и топливо	470	470	0.816	0.033	117 ± 50	30 ± 5

Примечание. T_f , T_a — температуры топлива и воздуха соответственно, \bar{v}_f , \bar{v}_a — их средние скорости.

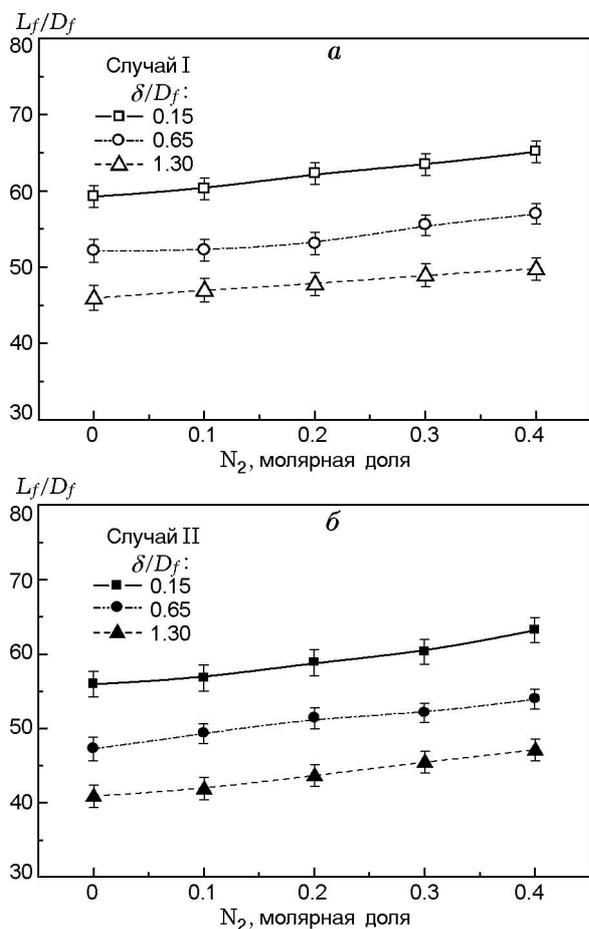


Рис. 2. Результаты измерения безразмерной длины пламени при добавлении азота в случае предварительно подогретого воздуха (а) и предварительно подогретых воздуха и топлива (б)

Интересно отметить, что длина пламени уменьшается с увеличением толщины кромки. Например, при $X_{N_2} = 0$ общее снижение длины пламени около 22 % при увеличении отношения толщины кромки δ/D_f от 0.15 до 1.3, однако при $X_{N_2} = 0.4$ длина пламени снижается на 24 %, что указывает на заметное влияние геометрии плохообтекаемого тела. На перемешивание влияют как толщина кромки, так и отношение скоростей в центральной струе и в кольце [3, 4]. Но в настоящей работе исследуется влияние только толщины кромки, так как отношение скоростей в центральной струе и в кольце поддерживается постоянным. Увеличение толщины кромки может усиливать интенсивность рециркуляции [1], и, следовательно, рециркуляционная зона увеличивает время пребывания элемента жидкости и позволя-

ет струям топлива и воздуха перемешиваться в этой области. В результате зона реакции, вероятно, сдвигается в сторону плохообтекаемого тела, что приводит к уменьшению длины пламени.

Предварительно подогретые воздух и топливо. Как видно из рис. 2, б, рост длины пламени при $\delta/D_f = 0.15, 0.65$ и 1.3 составляет около 12, 14 и 15 % при добавлении азота в диапазоне $X_{N_2} = 0 \div 0.4$. Это изменение длины пламени можно объяснить снижением максимальной температуры газа, что замедляет скорость реакции топливовоздушной смеси, и, таким образом, до начала горения требуется преодолеть большее расстояние, что приводит к росту длины пламени [21, 22]. Однако изменение температуропроводности смеси оказывает незначительное влияние на длину пламени по сравнению с максимальной температурой пламени. Из рис. 2, б также заметно влияние толщины кромки: при $X_{N_2} = 0$ и 0.4 длина пламени снижается соответственно на 27 и 25 % при увеличении δ/D_f от 0.15 до 1.3.

Как показано на рис. 1, б, длина пламени для предварительно подогретых воздуха и топлива (случай II) намного меньше, чем в случае предварительно подогретого воздуха, для всех толщин кромок. Например, для чистого сжиженного газа ($X_{N_2} = 0$) уменьшение длины пламени в случае II составляет около 13, 15 и 20 % при $\delta/D_f = 0.15, 0.65$ и 1.3 соответственно. Это означает, что на длину пламени заметное влияние, наряду с геометрией плохообтекаемого тела, оказывает входная температура реагентов. Это изменение можно объяснить ростом температуры пламени, которое обратно пропорционально длине пламени. Следовательно, вызванное предварительным подогревом увеличение температуры пламени приводит к уменьшению длины пламени.

2.2. Доля длины факела, свободная от сажи

Для того чтобы определить уменьшение уровня концентрации сажи, измеряется такой параметр, как доля длины, свободная от сажи (ДДСЖ). Изменение этого параметра показано на рис. 3.

Предварительно подогретый воздух. Согласно рис. 3, а увеличение ДДСЖ при добавлении N_2 ($X_{N_2} = 0 \div 0.4$) составляет около 135, 160 и 190 % для $\delta/D_f = 0.15, 0.65$ и 1.3 соответственно. Кроме того, ДДСЖ снижается

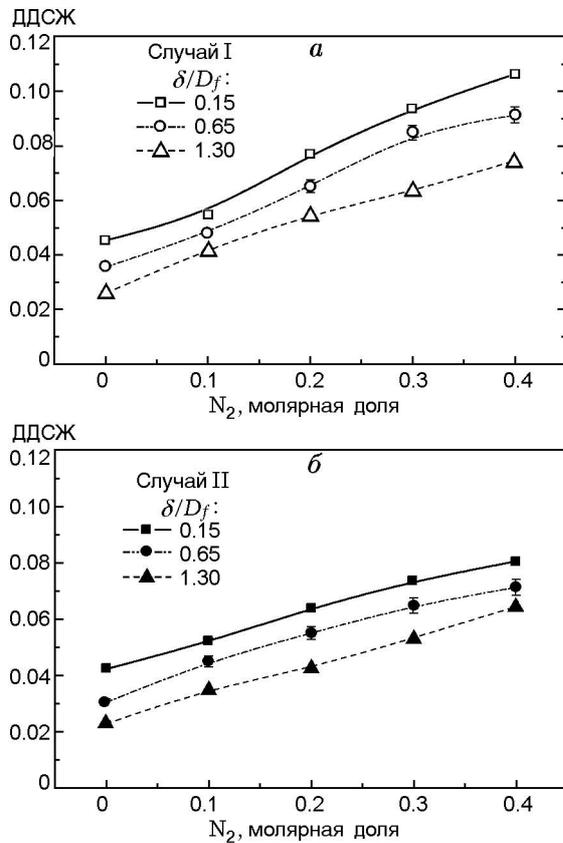


Рис. 3. Результаты изменения доли длины факела, свободной от сажи, при добавлении азота в случае предварительно подогретого воздуха (а) и предварительно подогретых воздуха и топлива (б)

при возрастании толщины кромки. Например, при $X_{N_2} = 0$ общее изменение ДДСЖ около 43 % при увеличении δ/D_f от 0.15 до 1.3, в то время как при $X_{N_2} = 0.4$ ДДСЖ снижается примерно на 30 %. Изменение ДДСЖ можно объяснить увеличением температуры газа, вызванным лучшим перемешиванием, которое, в свою очередь, снижает период индукции образования сажи и, следовательно, долю длины, свободную от сажи [16].

Предварительно подогретые воздух и топливо.

Согласно рис. 3, б при $\delta/D_f = 0.15, 0.65$ и 1.3 увеличение ДДСЖ при добавлении N_2 ($X_{N_2} = 0 \div 0.4$) составляет около 91, 135 и 180 % соответственно. Это может быть обусловлено снижением концентрации топлива и температуры пламени, которые, вероятно, уменьшают концентрацию предшественника сажи, что приводит к снижению концентрации сажи [18].

Кроме того, ДДСЖ, измеренная для пред-

варительно нагретых воздуха и топлива (случай II), намного меньше, чем при предварительном подогреве только воздуха (случай I). Например, для чистого сжиженного газа ($X_{N_2} = 0$) снижение ДДСЖ в случае II при $\delta/D_f = 0.15, 0.65$ и 1.3 составляет соответственно 18, 27 и 16 %. Это свидетельствует о том, что на концентрацию сажи оказывает влияние температура реагентов, которая, повышая температуру пламени, приводит к увеличению доли объема сажи [18].

2.3. Доля излучения

Увеличение лучистого теплового потока от пламени вследствие образования сажи может вызвать снижение температуры пламени и, таким образом, снижение скорости образования NO_x посредством теплового механизма [14, 15]. На рис. 4 показано изменение доли теп-

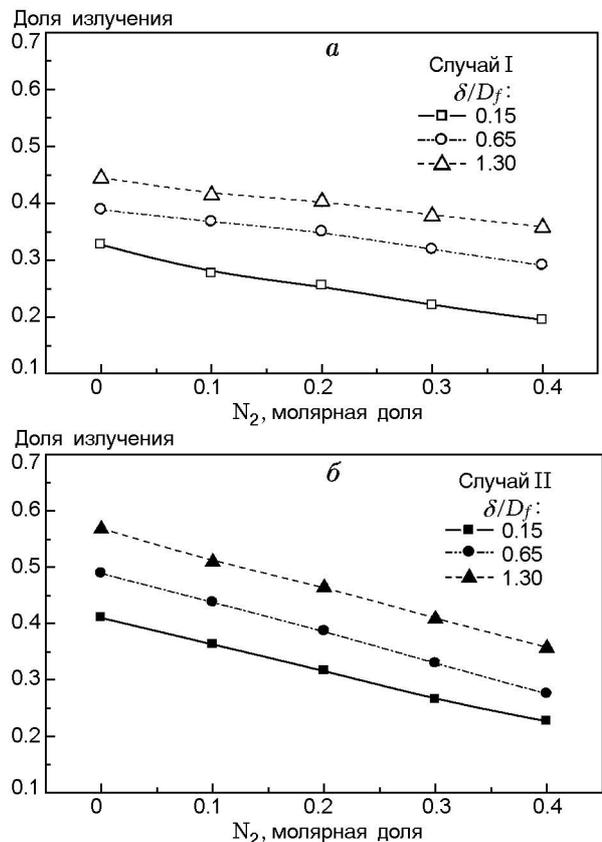


Рис. 4. Результаты измерения доли теплового излучения при добавлении азота в случае предварительно подогретого воздуха (а) и предварительно подогретых воздуха и топлива (б)

лового излучения при изменении молярной доли N_2 для предварительно подогретых воздуха и воздуха/топлива соответственно.

Предварительно подогретый воздух. Как видно из рис. 4,а, для всех толщин кромки добавление N_2 постепенно снижает долю теплового излучения: при $\delta/D_f = 0.15, 0.65, 1.3$ и $X_{N_2} = 0 \div 0.4$ убывание составляет около 40, 25 и 19 % соответственно. Выше указывалось (см. рис. 3), что добавление азота в поток топлива снижает концентрацию сажи и тем самым уменьшает радиационные потери тепла [18]. Более того, при увеличении δ/D_f от 0.15 до 1.3 радиационные потери увеличиваются при $X_{N_2} = 0$ и 0.4 примерно на 36 и 84 % соответственно, что можно объяснить ростом концентрации сажи вследствие снижения периода индукции [16], как обсуждалось выше.

Предварительно подогретые воздух и топливо. Как видно из рис. 4,б, при $\delta/D_f = 0.15, 0.65$ и 1.3 добавление N_2 в струю топлива снижает долю излучения примерно на 45, 44 и 37 % соответственно, поскольку при этом уменьшается концентрация сажи. Интересно отметить, что в случае II доля теплового излучения выше, чем в случае I, для всех трех толщин кромки. Например, для чистого сжиженного газа ($X_{N_2} = 0$) в случае II увеличение доли составляет 25, 26 и 28 % при $\delta/D_f = 0.15, 0.65$ и 1.3 соответственно, вследствие увеличения объемной доли сажи, как было установлено в [18].

2.4. Измерения температуры

В табл. 3 и 4 приведены максимальные температуры газа для чистого сжиженного газа ($X_{N_2} = 0$) и этого же газа, разбавленного 40 % N_2 ($X_{N_2} = 0.4$), в случаях предварительно подогретых воздуха (случай I) и воздуха/топлива (случай II).

Предварительно подогретый воздух. При добавлении азота в поток топлива максимальная температура газа заметно снижается для всех

Таблица 3
Максимальная температура газа для случая I

δ/D_f	T_{\max}, K	
	$X_{N_2} = 0$	$X_{N_2} = 0.4$
0.15	1348	1157
0.65	1354	1196
1.3	1386	1252

Таблица 4
Максимальная температура газа для случая II

δ/D_f	T_{\max}, K	
	$X_{N_2} = 0$	$X_{N_2} = 0.4$
0.15	1652	1508
0.65	1792	1654
1.3	1807	1710

толщин кромок ($X_{N_2} = 0 \div 0.4$), что вызвано влиянием разбавления. С увеличением размера кромки максимальная температура газа растет. Это свидетельствует о заметном влиянии геометрии горелки на усиление перемешивания за счет усиления интенсивности рециркуляционной зоны [1, 4].

Предварительно подогретые воздух и топливо. Для всех толщин кромок максимальная температура газа убывает при добавлении инертного газа, однако изменение температуры намного меньше, чем в случае I (см. табл. 4). При увеличении толщины кромки пиковая температура газа становится выше, чем в случае I, вследствие усиления перемешивания, вызванного, как и выше, более сильной и более интенсивной рециркуляционной зоной [1, 4].

2.5. Уровень эмиссии NO_x

Изменение индекса эмиссии NO_x ($EINO_x$) при изменении молярной доли N_2 в случае предварительно подогретых воздуха и воздуха/топлива показан на рис. 5.

Предварительно подогретый воздух. Для всех размеров кромки добавление N_2 в поток топлива постепенно снижает уровень выбросов NO_x (рис. 5,а): при $\delta/D_f = 0.15, 0.65, 1.3$ и $X_{N_2} = 0 \div 0.4$ уровень $EINO_x$ уменьшается соответственно на 13, 13 и 16 %. Выше уже отмечалось (см. рис. 2), что добавление N_2 в поток топлива заметно увеличивает длину пламени. В ламинарном диффузионном пламени скорость газа возрастает от основания пламени к вершине [22], т. е. растет с увеличением длины пламени вследствие добавления N_2 и, следовательно, снижает время пребывания газов смеси и индекс эмиссии NO_x .

Наоборот, при увеличении толщины кромки значения $EINO_x$ при $X_{N_2} = 0$ и 0.4 увеличиваются примерно на 17 и 14 % соответственно (см. рис. 5,а) с ростом отношения δ/D_f от 0.15

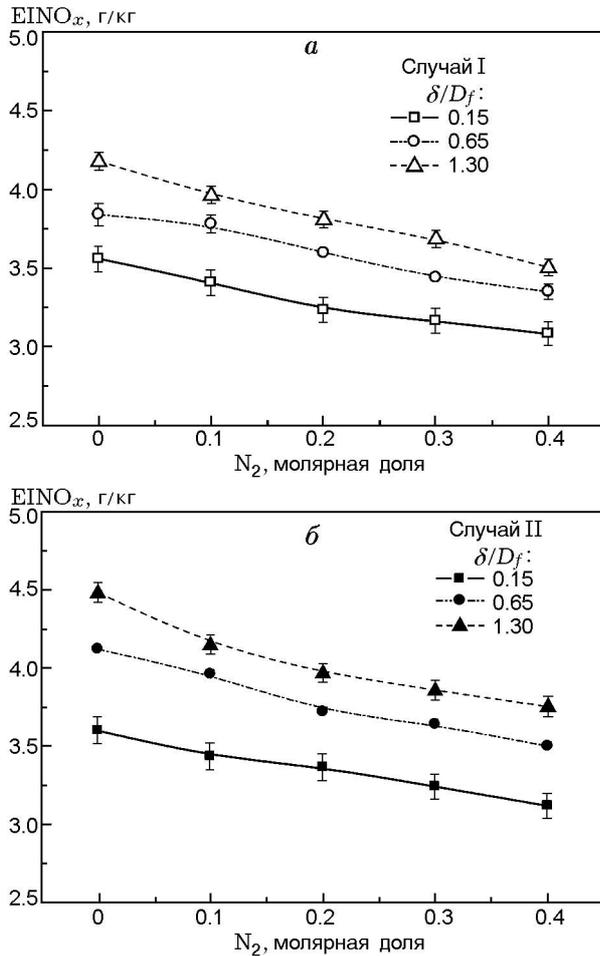


Рис. 5. Результаты измерения индекса эмиссии NO_x при добавлении азота в случае предварительно подогретого воздуха (а) и предварительно подогретых воздуха и топлива (б)

до 1.3. Как обсуждалось в [1], увеличение толщины кромки приводит к увеличению размера рециркуляционной зоны [5] и времени пребывания. В результате значения $EINO_x$ увеличиваются.

Предварительно подогретые воздух и топливо.

На рис. 5,б показано изменение индекса эмиссии NO_x при варьировании молярной доли N_2 в диапазоне $0 \div 0.4$ для предварительно подогретых воздуха и топлива. При $\delta/D_f = 0.15$ падение уровня эмиссии составляет около 13 %, а при $\delta/D_f = 0.65$ и 1.3 — около 15 и 16 % соответственно. При увеличении толщины кромки наблюдается рост значений $EINO_x$.

Как и ожидалось, для предварительно нагретых воздуха и топлива (случай II) индекс эмиссии NO_x выше, чем в случае предварительно подогретого воздуха (случай I), что, возможно, вызвано увеличением концентрации NO_x в соответствии с механизмом Зельдовича [18].

ВЫВОДЫ

Экспериментально исследовано влияние добавления N_2 в условиях предварительного нагрева на такие параметры, как длина пламени, доля длины факела, свободная от сажи, доля теплового излучения, температура газа и индекс эмиссии NO_x в диффузионном пламени струи сжиженного газа, стабилизированном с помощью плохообтекаемого тела. Исследовались два случая: I — предварительно подогретый воздух, II — предварительно подогретые воздух и топливо. В каждом случае использовались два плохообтекаемых тела формы тюльпана с различными толщинами кромки: $\delta/D_f = 0.65$ и $\delta/D_f = 1.3$. Результаты экспериментов показывают, что как в случае I, так и в случае II длина пламени увеличивается при добавлении N_2 , что можно объяснить понижением температуры пламени. Однако при увеличении толщины кромки и температуры реагентов длина пламени уменьшается.

В случаях I и II доля длины, свободная от сажи, увеличивается при добавлении азота вследствие снижения концентрации топлива и температуры пламени, а при увеличении толщины кромки и температуры реагентов, напротив, снижается, что обусловлено уменьшением периода индукции образования сажи и увеличением объемной доли сажи.

В случаях I и II доля теплового излучения увеличивается с ростом толщины кромки и температуры реагентов, поскольку последнее приводит к повышению уровня сажи.

В случаях I и II значения $EINO_x$ монотонно убывают при добавлении N_2 в силу уменьшения времени пребывания газов смеси. Индекс эмиссии NO_x увеличивается при росте толщины кромки и температуры реагентов, что приводит к увеличению времени пребывания вследствие влияния процессов в рециркуляционной зоне и повышения температуры пламени.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Esquiva-Dano I., Nguyen H. T., Escudie D.** Influence of a bluff-body's shape on the stabilization regime of non-premixed flames // *Combust. Flame*. 2001. V. 127. P. 2167–2180.
2. **Kimoto K., Shiraishi I., Matsumoto R.** Structure of turbulent jet flame stabilized in annular air jet // *Combust. Sci. Technol.* 1981. V. 25. P. 31–41.
3. **Tankin R. S., Roquemore W. M., Chiu H. H., Lottes S. A.** A study of a bluff-body combustor using laser sheet lighting // *Experiments in Fluids*. 1986. V. 4. P. 205–213.
4. **Ma H. K., Harn J. S.** The jet mixing effect on reaction flow in a bluff-body burner // *Intern. J. Heat and Mass Transfer*. 1994. V. 37. P. 2957–2967.
5. **Qamar N. H., Nathanb G. J., Alwahabia Z. T., King K. D.** The effect of global mixing on soot volume fraction: measurements in simple jet, precessing jet, and bluff body flames // *Combust. Flame*. 2005. V. 30. P. 1493–1500.
6. **Kent J. H., Bastin S. J.** Parametric effects on sooting in turbulent acetylene diffusion flames // *Combust. Flame*. 1984. V. 56. P. 29–42.
7. **Dally B. B., Masri A. R., Barlow R. S., Fiechtner G. J., Fletcher D. F.** Measurement of NO in turbulent non-premixed flames stabilized on a bluff-body // *Proc. 26th Intern. Symp. on Combustion*. 1996. P. 2191–2197.
8. **Dally B. B., Masri A. R., Barlow R. S., Fiechtner G. J.** Instantaneous and mean compositional structure of bluff-body stabilized non-premixed flames // *Combust. Flame*. 1998. V. 114. P. 119–148.
9. **Angrill O., Geitlinger H., Streibel T., Suntz R., Bockhorn H.** Influence of exhaust gas recirculation on soot formation in diffusion flames // *Proc. 28th Intern. Symp. on Combustion*. 2000. P. 2643–2649.
10. **Zhang J., Pu Y., Zhou L.** Turbulence characteristics of swirling reacting flow in a combustor with staged air injection // *Chinese J. Chem. Engng.* 2006. V. 14. P. 634–641.
11. **Cho E. S., Chung S. H.** Characteristics of NO_x emission with flue gas dilution in air and fuel sides // *KSME Intern. J.* 2004. V. 18. P. 2303–2309.
12. **Toshimi T., Xu Z., Masaharu K.** Preferential diffusion effects on the temperature in usual and inverse diffusion flames // *Combust. Flame*. 1996. V. 106. P. 252–260.
13. **Ishiguro T., Tsuge S., Furuhashi T., Kitagawa K., Arai N., Hasegawa T., Tanaka R., Gupta A. K.** Homogenization and stabilization during combustion of hydrocarbons with preheated air // *Proc. 27th Intern. Symp. on Combustion*. 1998. P. 3205–3213.
14. **Toshiro F., Riechelmann D., Juntchi S.** Effect of liftoff on NO_x emission of turbulent jet flame in high temperature coflowing air // *Ibid.* P. 1149–1155.
15. **Turns S. R., Myhr F. H.** Oxides of nitrogen emissions from turbulent jet flames: Part I-Fuel effects and flame radiation // *Combust. Flame*. 1991. V. 87. P. 319–335.
16. **Kellerer H., Muller A., Bauer H. J., Wittig S.** Soot formation in a shock tube under elevated pressure conditions // *Combust. Sci. Technol.* 1996. V. 113. P. 67–80.
17. **Axelbaum R. L., Law C. K.** Soot formation and inert addition in diffusion flames // *Proc. 23rd Intern. Symp. on Combustion*. 1990. P. 1517–1523.
18. **Gulder O. L., Snelling D. R., Sawchuk R. A.** Influence of hydrogen addition to fuel on temperature field and soot formation in diffusion flames // *Proc. 26th Intern. Symp. on Combustion*. 1996. P. 2351–2358.
19. **Feese J. J., Turns S. R.** Nitric oxide emission in laminar diffusion flame: effects of air side versus fuel side diluent addition // *Combust. Flame*. 1998. V. 113. P. 66–78.
20. **Roper F. G.** The prediction of laminar jet diffusion flame sizes: Part I. Theoretical model // *Combust. Flame*. 1977. V. 29. P. 219–226.
21. **Roper F. G., Smith C., Cunningham A. C.** The prediction of laminar jet diffusion flame sizes: Part II. Theoretical model // *Combust. Flame*. 1977. V. 29. P. 227–234.
22. **Santoro R. J., Yeh T. T., Horvath J. J., Semerjian H. G.** The transport and growth of soot particles in laminar diffusion flames // *Combust. Sci. Technol.* 1987. V. 53. P. 89–115.

*Поступила в редакцию 4/VIII 2007 г.,
в окончательном варианте — 14/IV 2008 г.*