

УДК 533.656:662.969

ВЛИЯНИЕ ЗАГЛУБЛЕНИЯ ЦЕНТРАЛЬНОЙ СТРУИ ВОЗДУХА НА ФОРМУ И СВЕЧЕНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ИНВЕРСНОГО ДИФФУЗИОННОГО ПЛАМЕНИ ПРИРОДНОГО ГАЗА

С. Махеш, Д. П. Мишра

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

Изучалось влияние заглубления центральной струи воздуха на коаксиальной горелке в турбулентном инверсном диффузионном пламени природного газа на видимую высоту, зону сужения и интенсивность свечения пламени. Заглубление внутреннего канала коаксиальной горелки устанавливалось равным $0.25d_a$, $0.5d_a$ и $1.0d_a$, где d_a — внутренний диаметр центральной трубки. Визуальные наблюдения показывают, что в отсутствие заглубления высота пламени и высота положения зоны сужения относительно края горелки экспоненциально уменьшаются с ростом числа Рейнольдса струи воздуха. Однако при увеличении заглубления наблюдается лишь незначительное уменьшение видимой высоты пламени и высоты положения зоны сужения. При заглублении, превышающем некоторое критическое значение, зона сужения у основания пламени исчезает. Установлено, что заглубление центральной струи эффективно для устранения богатой горючим зоны и кольцевой зоны свечения сажи у основания турбулентного инверсного диффузионного пламени природного газа при малых числах Рейнольдса воздушной струи.

Ключевые слова: турбулентное инверсное диффузионное пламя, заглубление, свечение пламени, зона сужения.

ВВЕДЕНИЕ

Под термином «инверсное диффузионное пламя» (ИДП) понимают определенный тип турбулентного диффузионного пламени в коаксиальных струях, которое стабилизируется в такой системе, когда через центральный канал подают высокоимпульсную струю воздуха, а через кольцевой зазор коаксиальной горелки — низкоимпульсный поток горючего. Соотношение импульсов струй воздуха и горючего на выходе из горелки оказывает сильное влияние на структуру этого пламени [1–5]. Другими словами, переход от всплывающего светящегося диффузионного пламени к слабосветящемуся пламени, в котором импульс потоков играет определяющую роль, можно осуществить путем изменения соотношения импульсов воздуха и горючего на выходе. Кроме того, такая конфигурация способствует улучшению перемешивания кольцевой низкоимпульсной струи горючего с высокоимпульсной струей воздуха, что обеспечивает интенсивное горение в компактном объеме.

В работах [1–6] сообщалось, что с увеличением отношения импульсов воздуха и горючего на выходе уменьшается видимая высота пламени, увеличивается температура газа на осевой линии, при этом растет градиент температуры и ослабляется свечение пламени. Авторы работы [1] исследовали характеристики турбулентного метанового ИДП на коаксиальной горелке с изменяющимся отношением диаметров трубок и показали, что видимую высоту пламени, распределение температуры и пределы стабилизации пламени можно оптимизировать путем изменения отношения скоростей струй воздуха и горючего на выходе и отношения диаметров коаксиальных трубок. Позже в работе [2] для горелки с кольцевым расположением сопел и коаксиальных горелок было проведено сравнительное исследование характеристик турбулентного ИДП сжиженного нефтяного газа, таких как внешний вид, видимая высота пламени, распределение температуры пламени, концентрация кислорода на осевой линии, содержание NO_x . Характеристики пламени на горелке с кольцевым расположением сопел оказались лучше (слабое свечение, высокая максимальная температура, быстрый спад концентрации кислорода вдоль осе-

вой линии), что указывает на роль геометрии горелки. В работе [6] авторы предложили получать турбулентное ИДП оптимальной высоты и повышенной стабильности путем изменения положения плоскости инъекции центральной струи воздуха относительно кольцевой струи горючего. Достигалось это путем заглубления центральной трубки относительно внешней трубки коаксиальной горелки на расстояние от $5d_a$ до $40d_a$, где d_a — внутренний диаметр центральной трубки. Более того, авторы [6] измерили профили скорости в различных сечениях коаксиальных струй воздух — метан при различных заглублениях струи воздуха относительно кольцевой струи метана и обнаружили интенсивное смешивание в пограничном слое. Экспериментальное исследование турбулентного ИДП сжиженного нефтяного газа [3–5] показало, что на горелке с обратным уступом характеристики пламени лучше (меньше видимая высота, выше температура на осевой линии, меньше содержание NO_x), чем на коаксиальной горелке с заглублением центральной струи. Более того, в экспериментах [3–5] получен новый параметр корреляции для видимой высоты турбулентного ИДП на горелке с обратным уступом — отношение полных импульсов. По результатам измерения температуры газа на оси и концентрации кислорода, а также визуализации хемилюминесценции CH^* была определена зона предварительного смешивания и свечения в турбулентном ИДП сжиженного нефтяного газа.

Из литературы известно, как характеристики турбулентного ИДП зависят от геометрии горелки, и это можно использовать для получения турбулентных ИДП с малой высотой пламени, слабым свечением, высокой температурой и низкими выбросами вредных веществ. Цель настоящего экспериментального исследования — установить характеристики турбулентного ИДП природного газа, такие как видимая высота пламени, зона сужения и интенсивность свечения пламени, на обычной коаксиальной горелке, модифицированной путем незначительного заглубления центрального канала. Несмотря на то что характеристики турбулентного ИДП сжиженного нефтяного газа на коаксиальной горелке с небольшим заглублением струи воздуха изучались ранее в работе [5], сопоставление результатов исследования турбулентного ИДП на горелке с малым заглублением воздушной струи и без заглубления

не проводилось. Важно отметить, что при увеличении заглубления центральной струи воздуха обеспечивается его более сильное перемешивание с горючим, но это, наоборот, может неблагоприятно повлиять на стабильность пламени и безопасность работы горелки. Однако можно предположить, что небольшая высота заглубления струи воздуха увеличит степень предварительного смешивания струй воздуха и горючего, что, в свою очередь, улучшит характеристики безопасности и стабильности турбулентного ИДП.

1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 1 показаны схема коаксиальной горелки с заглубленным центральным каналом и схема экспериментальной установки, используемые в настоящей работе. Инверсное диффузионное пламя стабилизировалось на коаксиальной горелке с внутренним диаметром центральной трубки $d_a = 9$ мм и отношением площади поперечного сечения центральной трубки к площади поперечного сечения кольцевого зазора $A_i/A_{an} = 0.48$ на выходе из горелки. Конструкцией горелки предусмотрена возможность продольного перемещения центральной трубки относительно внешней. В данной работе торец внутренней трубки был заглублен относительно среза внешней трубки на расстояние $0.25d_a$, $0.5d_a$ и $1.0d_a$. Это малое заглубление по сравнению с используемым в работе [6], где оно составляло от $5d_a$ до $40d_a$.

Осушенный сжатый воздух подавался через центральную трубку. В качестве горючего использовался природный газ (90 % CH_4 , 5 % C_2H_6 , 2 % C_3H_8 , 3 % CO_2). Расходы воздуха и горючего контролировались с помощью откалиброванных датчиков массового расхода газа. Число Рейнольдса центральной струи воздуха варьировалось в диапазоне $3400 \div 9200$, при этом расход топлива через кольцевую щель поддерживался постоянным на уровне $4.6 \cdot 10^{-5}$ кг/с. Пламя снимали цифровой видеокамерой Sony 10X Handycam со скоростью 24 кадр/с. Из видеозаписи извлекались отдельные снимки и с помощью пакета MATLAB (версии 7.0.1) определяли видимую высоту пламени, высоту положения зоны сужения над краем горелки и суммарную интенсивность свечения пламени. Полученные RGB-изображения сначала конвертировали в полутоновые снимки, затем в системе

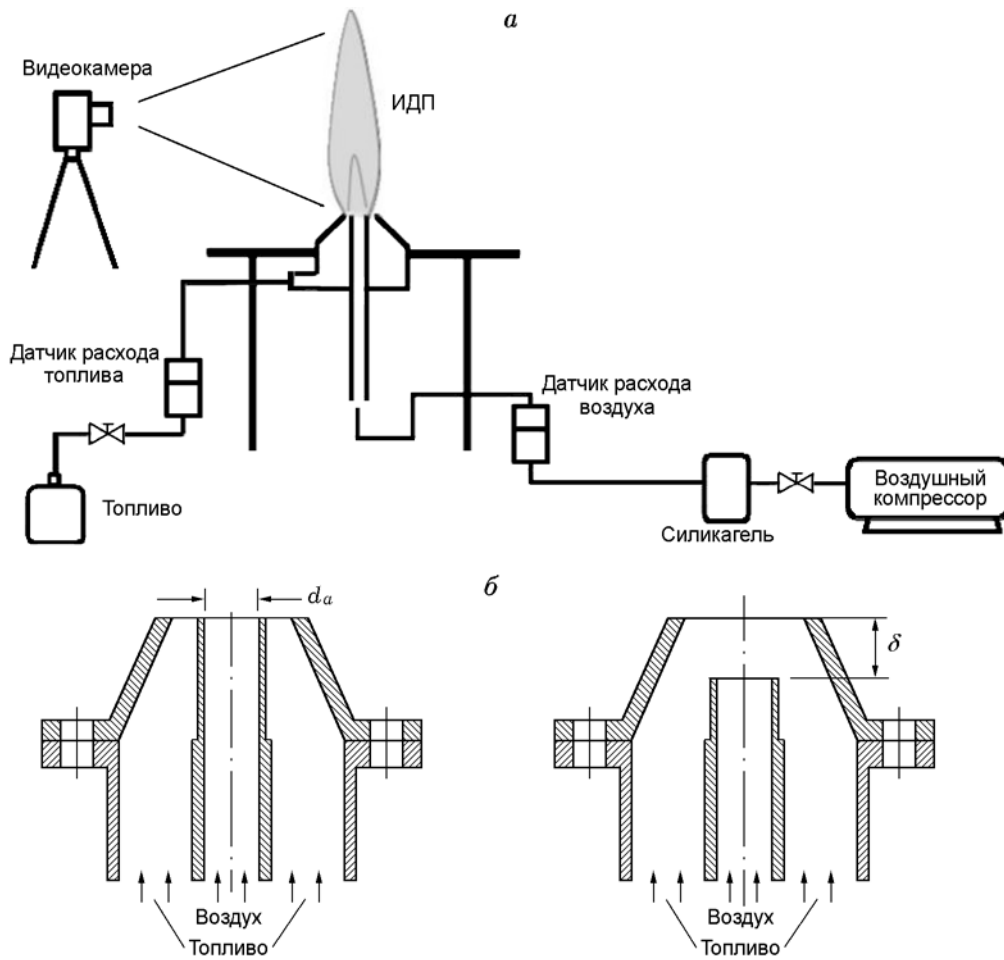


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (а) и схема горелки без заглабления центрального канала и с заглаблением (б)

MATLAB 7.0.1 подвергали пороговой бинаризации по методу Оцу, чтобы определить положение кончика пламени. В этом методе порог находили путем минимизации внутриклассовой дисперсии черных и белых пикселей полутонового изображения. Среднюю высоту пламени и ее стандартное отклонение определяли по 72 снимкам. Большое количество снимков взято в целях повышения точности, поскольку положение кончика пламени флуктуировало. В конечном итоге видимая высота пламени была рассчитана из полученных снимков относительно диаметра среза внешней трубки горелки. В этой работе в качестве меры суммарной интенсивности свечения пламени для различных заглаблений центрального канала ис-

пользовалась яркость $\langle I \rangle$ — средняя яркость по всем пикселям на изображении, полученном осреднением 72 снимков. Из осредненного по времени изображения пламени вычиталась фоновая яркость, чтобы уменьшить ее влияние на среднюю интенсивность свечения пламени. Зона сужения у основания пламени идентифицировалась визуально по осредненному по времени изображению, поскольку эта область пламени не флуктуировала, в отличие от кончика пламени. Профиль зоны сужения отчетливо виден у основания пламени на темном фоне. Высота этой зоны определялась из осредненного по времени изображения пламени.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Видимая высота пламени

Одной из фундаментальных характеристик диффузионного пламени газовых струй является видимая высота пламени H_f — важный параметр при классификации по размерам применяемых на практике горелок и устройств сжигания. В случае турбулентного ИДП по видимой высоте пламени можно на качественном уровне судить о влиянии высокоимпульсной центральной струи воздуха и геометрии горелки на размер реакционной зоны [1–6].

В настоящей работе определена относительная видимая высота турбулентного ИДП (H_f/d_a) природного газа при четырех значениях безразмерного заглубления (δ/d_a) центрального канала и, соответственно, при восьми значениях числа Рейнольдса центральной струи воздуха ($Re_a = v_a d_a / \nu_a$, где v_a — скорость струи воздуха, ν_a — кинематическая вязкость в струе воздуха). Результаты приведены на рис. 2. Видно, что безразмерная видимая высота пламени уменьшается экспоненциально с ростом Re_a при всех используемых заглублениях. Однако при фиксированном числе Re_a изменение высоты пламени с изменением заглубления весьма незначительно, что также наблюдалось в работе [6]. Это связано с тем, что при заглублении центрального канала и более высокой скорости струи воздуха время совместного пребывания газа из струи воздуха и струи го-

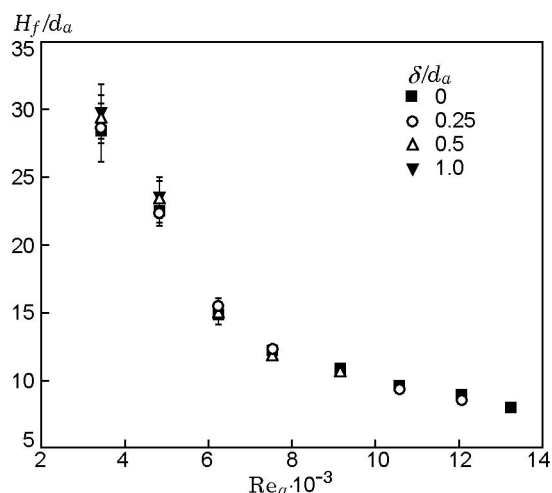


Рис. 2. Изменение относительной видимой высоты пламени при различных заглублениях центральной струи

рючего уменьшается и, таким образом, не обеспечивается достаточного перемешивания для получения пламени меньшей высоты.

2.2. Свечение пламени

Свечение частиц сажи в пламени, стабилизированном в струях газа, является косвенным индикатором зон пламени, где имеется избыток горючего. Ослабление свечения свидетельствует о том, что коэффициент избытка горючего в целом по зоне пламени соответству-

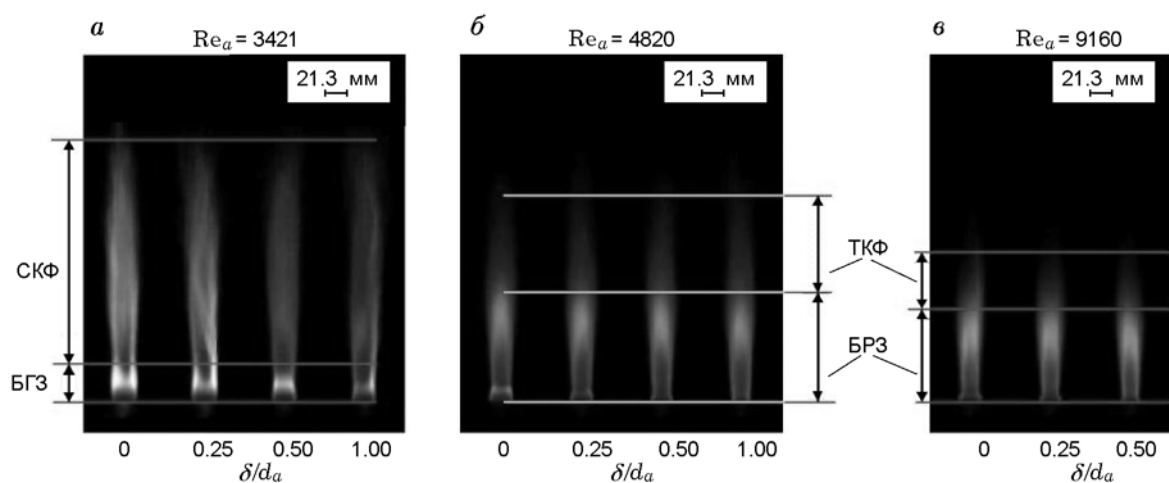


Рис. 3. Изображения пламени при различных заглублениях центрального канала:

СКФ — светящийся конец пламени, ТКФ — тусклый конец пламени, БРЗ — большая реакционная зона, БГЗ — богатая горючим зона

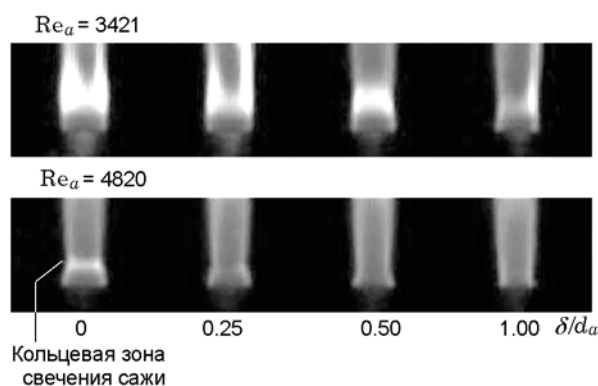


Рис. 4. Богатая горючим зона и кольцевая зона свечения сажи у основания пламени при различных значениях δ/d_a и Re

ет бедной смеси, а это, в свою очередь, служит качественным признаком полного расхождения горючего в пламени.

На рис. 3 показаны осредненные по времени изображения пламени при различных значениях δ/d_a и Re_a . Как видно из рис. 3,а, при $Re_a = 3421$ светимость пламени уменьшается с ростом δ/d_a . В пламени наблюдаются богатая горючим зона, расположенная вблизи края горелки, и затяжной светящийся конец факела при $\delta/d_a = 0$. Размер богатой горючим зоны пламени уменьшается с ростом δ/d_a (причины этого обсуждаются ниже). Излучение частиц сажи ослабевает с ростом δ/d_a . В случае $Re_a = 3421$ флуктуации положения кончика пламени особенно сильны при любом заглублении. Затем при более высоких числах Re_a флуктуации существенно уменьшаются за счет увеличения импульса центральной струи воздуха. При $Re_a \approx 4820$ пламя характеризуется большой реакционной зоной и тусклым концом факела (рис. 3,б). Реакционная зона имеет насыщенный синий цвет и удлиненную параболическую форму, что указывает на эффективное турбулентное перемешивание за счет большого значения отношения импульсов потоков воздуха и горючего на выходе из горелки; такое перемешивание отсутствует в пламени с $Re_a = 3421$ при любых заглублениях центрального канала. Более того, как видно из рис. 4, при $Re_a = 4820$ излучение сажи полностью затухает, за исключением зоны вблизи основания пламени при $\delta/d_a = 0$. В этом случае ($Re_a = 4820$ при $\delta/d_a = 0$) наблюдается кольцевая зона свечения сажи у основания пламени, которая исчезает при заглублении центрального канала

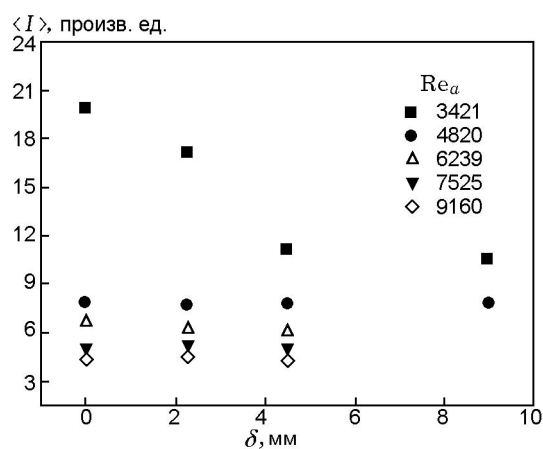


Рис. 5. Зависимость осредненной интенсивности свечения пламени от заглубления центрального канала горелки

ла $\delta/d_a = 0.5$. С увеличением δ/d_a не только не изменяется видимая высота пламени, не видна разница и в интенсивности его свечения. При $Re_a = 9160$ характеристики пламени аналогичны случаю $Re_a = 4820$, за исключением того, что высота тусклого конца факела уменьшается, как видно из рис. 3,в. Информацию о влиянии δ/d_a на исследуемое турбулентное ИДП может дать количественное определение полной интенсивности свечения пламени. Эта процедура описана в § 1.

Из рис. 5 очевидно, что осредненная интенсивность свечения пламени ослабевает с увеличением заглубления центральной струи только в случае $Re_a = 3421$. Это связано с сокращением характерной длины зоны предварительного перемешивания, которое создается за счет заглубления центральной струи, что делает более эффективным частичное перемешивание воздуха и горючего в струях вблизи края горелки и сокращает тем самым богатую горючим зону у основания пламени. Однако осредненная интенсивность свечения пламени почти не изменяется с ростом δ/d_a при $Re_a > 3421$. Поскольку массовый расход горючего поддерживается постоянным, увеличение массового расхода воздуха до некоторого критического значения приводит к тому, что в целом по зоне пламени достигается коэффициент избытка горючего, соответствующий бедному пределу распространения, в результате чего пламя гаснет. Поэтому при приближении к бедному пределу за счет увеличения скорости центральной струи воздуха интенсивность свечения пламени также достигает некоторого пре-

дельного значения и, таким образом, заглубление центрального канала не оказывает влияния на общую интенсивность свечения пламени. Однако небольшое заглубление струи воздуха, как видно, расширяет зону частичного предварительного смешивания вблизи края горелки и устраняет богатую горючим зону при более низком значении Re_a , которая в противном случае могла бы существовать только при большем массовом расходе воздуха.

2.3. Высота зоны сужения

В турбулентном ИДП вблизи края горелки может присутствовать небольшая область поперечного утолщения пламени, за которой вниз по потоку следует зона, где поперечный размер пламени уменьшается, — так называемая зона сужения. Эта зона формируется за счет проникновения горючего из кольцевого потока в центральную струю воздуха. Формирование этой зоны у основания ИДП зависит от отношения импульсов воздуха и горючего на выходе из горелки. Знание того, как высота зоны сужения зависит от числа Рейнольдса Re_a , позволяет понять влияние центральной струи воздуха на процесс вовлечения горючего из кольцевого потока и на стабильность пламени. Следует также отметить, что если отношение импульсов воздуха и горючего меньше некоторого критического значения, то в зоне сужения наблюдается желтоватая светящаяся область в виде кольца, называемая кольцевой зоной свечения сажи. Механизм образования такого свечения пока еще до конца не ясен.

Результаты изучения влияния заглубления центральной струи воздуха на высоту зоны сужения H_n при различных числах Re_a и постоянной скорости потока горючего приведены на рис. 6. Видно, что с увеличением Re_a при всех заглублениях, кроме $\delta/d_a = 1.0$, безразмерная высота зоны сужения (H_n/d_a) экспоненциально уменьшается, причем при $\delta/d_a = 0$ и $\delta/d_a = 0.25$ уменьшается в два раза. Увеличение Re_a усиливает процесс вовлечения горючего из низкоимпульсного кольцевого потока и способствует смешиванию на более коротком расстоянии от края горелки, что приводит к уменьшению высоты зоны сужения. Интересно отметить, что зона сужения исчезает при $\delta/d_a = 1.0$ и $Re_a = 4820$, как видно из рис. 7, а. Это можно объяснить с помощью рис. 7, б следующим образом. При $\delta/d_a = 1.0$ увлечение горючего струей воздуха происходит внутри го-

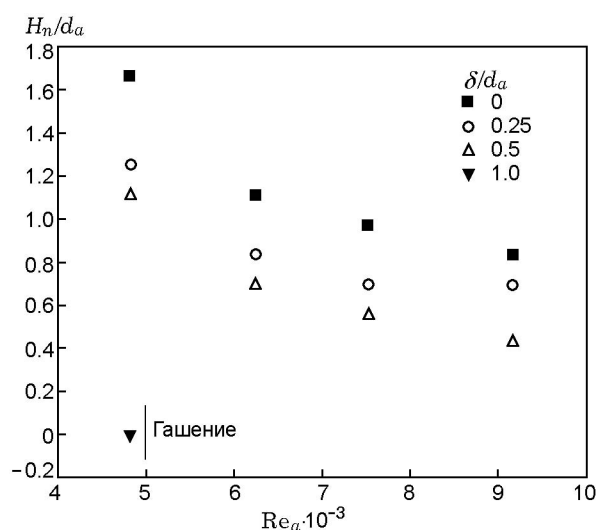


Рис. 6. Высота зоны сужения, определенная из осредненных изображений пламени, при различных заглублениях центрального канала

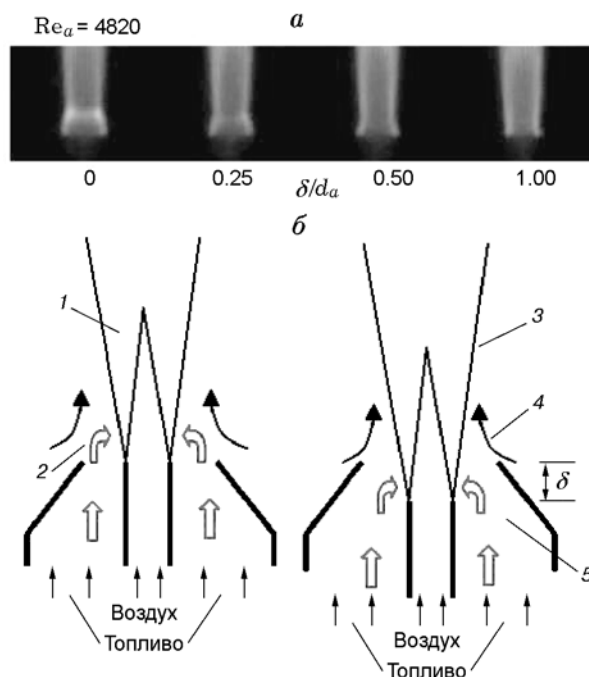


Рис. 7. Зона сужения у основания пламени при различных заглублениях центрального канала (а), схематическое изображение течения газа в обычной коаксиальной горелке и коаксиальной горелке с небольшим заглублением центрального канала (б):

1 — потенциальное ядро центральной струи воздуха, 2 — горючее, вовлекаемое в поток на выходе из горелки, 3 — граница воздушной струи, 4 — вовлечение атмосферного воздуха, 5 — горючее, увлекаемое внутри потока

релки (ниже уровня верхнего края горелки), поэтому на выходе из нее зона сужения при $Re_a = 4820$ не наблюдается, в отличие от случая обычной коаксиальной горелки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально изучено влияние заглупления центральной струи воздуха в турбулентном ИДП природного газа на видимую высоту пламени, общую интенсивность свечения пламени и высоту зоны сужения. По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Увеличение заглупления при фиксированном значении Re_a приводит к незначительному уменьшению видимой высоты турбулентного ИДП природного газа. Это может быть связано с недостаточным временем совместного пребывания газа из струи воздуха и струи горючего для того, чтобы обеспечить эффективное перемешивание на более короткой длине, которая определяется заглуплением центрального канала.

2. В результате количественного определения интенсивности свечения пламени по величине осредненной яркости его изображений установлено, что свечение пламени ослабевает с ростом заглупления только при $Re_a = 3421$. Обнаружено, что богатая горючим зона и кольцевая зона свечения сажи у основания пламени исчезают с увеличением заглупления при $Re_a = 3421$ и 4820 . Это указывает на то, что богатую горючим зону с содержанием сажи можно устранить путем изменения заглупления центральной струи воздуха при сохранении массового расхода воздуха. Однако при Re_a , превышающем некоторое критическое значение, влияние заглупления на свечение пламени не наблюдается. Поскольку массовый расход горючего поддерживается постоянным, увеличение массового расхода воздуха

до некоторого критического значения приводит к тому, что в целом по зоне пламени коэффициент избытка горючего становится соответствующим бедному пределу распространения. В результате интенсивность свечения пламени также достигает некоторого предельного значения и, таким образом, заглупление центрального канала не влияет на общую интенсивность свечения пламени при больших значениях числа Рейнольдса воздушной струи.

3. Установлено, что заглупление центральной струи воздуха оказывает сильное влияние на высоту зоны сужения: она экспоненциально падает с ростом Re_a при заглуплениях $\delta/d_a = 0 \div 0.5$, а при $\delta/d_a = 1.0$ и $Re_a = 4820$ эта зона исчезает совсем, что связано с увлечением горючего струей воздуха и перемешиванием горючего и воздуха внутри горелки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sobiesiak A., Wenzell J. C. Characteristics and structure of inverse flame of natural gas // Proc. Combust. Inst. — 2005. — V. 30. — P. 743–749.
2. 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. Flame. — 2006. — V. 144. — P. 237–248.
3. Mahesh S., Mishra D. P. Stability and emission characteristics of turbulent LPG IDF in a backstep burner // Fuel. — 2008. — V. 87. — P. 2614–2619.
4. Mahesh S., Mishra D. P. Flame structure of LPG — air Inverse Diffusion Flame in a backstep burner // Fuel. — 2010. — V. 89, N 8. — P. 2145–2148.
5. Махеш С., Мишра Д. П. Исследование турбулентного инверсного диффузионного пламени в горелке с обратным уступом и заглупленной соосной горелке // Физика горения и взрыва. — 2011. — Т. 47, № 3. — С. 30–36.
6. Lee T. W., Fenton M., Shankland R. Effects of variable partial premixing on turbulent jet flame structure // Combust. Flame. — 1997. — V. 109. — P. 237–248.

Поступила в редакцию 21/VI 2012 г.