

УДК 536.46,532.517.3

РЕЖИМЫ НЕУСТОЙЧИВОГО ИСТЕЧЕНИЯ И ДИФфуЗИОННОГО ГОРЕНИЯ СТРУИ УГЛЕВОДОРОДНОГО ГОРЮЧЕГО

В. В. Леманов^{1,2}, В. В. Лукашов¹, Р. Х. Абдрахманов^{1,3}, В. А. Арбузов^{1,3},
Ю. Н. Дубнищев^{1,3}, К. А. Шаров¹

¹Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск, lemanov@itp.nsc.ru

²Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет, 630008 Новосибирск

³Новосибирский государственный технический университет, 630073 Новосибирск

Представлены результаты экспериментального исследования гидродинамики и диффузионного горения углеводородных струй. Рассмотрены режимы развития неустойчивости как в самом струйном пламени, так и внутри источника струи горючего. Опыты проведены при истечении дозвуковой газовой струи в воздушное пространство из длинной трубки диаметром 3.2 мм в диапазоне чисел Рейнольдса $200 \div 13\,500$. В качестве горючего использовались пропан-бутановая смесь в опытах с холодной струей без горения, а также чистый пропан и пропан в смеси с инертным разбавителем (CO_2 , He) для струйного пламени. Выполнены измерения средней скорости и пульсаций скорости в ближнем поле струи без горения. Из четырех режимов истечения холодной струи (диссипативный, ламинарный, переходный, турбулентный) исследованы три последних. Шлирен-методом выполнена визуализация реагирующего потока. Профили температуры в ближнем поле струи измерены с помощью Pt/Pt-Rh-термопары. В переходном режиме истечения пропана из трубки наблюдалось присоединенное ламинарное пламя. При горении смесей C_3H_8 с CO_2 или с He в диапазоне чисел Рейнольдса $1\,900 \div 3\,500$ переходный режим регистрировался в отсоединенном пламени. Турбулентные пятна, образующиеся в трубе в переходном режиме, оказывают существенное воздействие на положение передней кромки пламени: они могут как инициировать переход к турбулентному факелу, так и приводить к его ламинаризации.

Ключевые слова: диффузионное горение, управление горением, дозвуковые газовые струи, ламинарно-турбулентный переход, вихревые структуры, турбулентность, эксперимент, визуализация.

DOI 10.15372/FGV20180301

ВВЕДЕНИЕ

Управление процессами смешения и горения в струйных течениях является актуальной и важной задачей. В энергетике и химических технологиях широко используются устройства на основе процессов диффузионного горения углеводородных струй. Эта проблема достаточно подробно исследована и представлена в литературе [1]. Исходя из технологических требований, в основном используются струйные источники в виде отверстий, профилированных сопел, реже применяются трубки. Числа Рейнольдса в таких газовых струях, как правило, больше 4 000, а режимы течения турбулентные [2]. Для управления процессами горения и

смешения используют разные методы: подмешивание инертных газов, коаксиальные и закрученные струи, вибрационное, акустическое и плазменное воздействие и др. Одним из перспективных методов управления пламенем является струйное диффузионное горение в режиме развития неустойчивости в самом струйном факеле и внутри источника формирования струи.

Неустойчивость газовых струй (без горения) возникает при малых числах Рейнольдса ($\text{Re} = 10 \div 30$) и изучена достаточно подробно [3, 4]. Однако переход к турбулентности в струях происходит при существенно больших числах $\text{Re} = 500 \div 2\,000$ и в экспериментальном плане исследован недостаточно [5–11]. Это связано с тем, что на практике, в первую очередь в авиации и космонавтике, представляют интерес большие числа Рейнольдса, характерные для струй, истекающих

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-08-00958).

© Леманов В. В., Лукашов В. В., Абдрахманов Р. Х., Арбузов В. А., Дубнищев Ю. Н., Шаров К. А., 2018.

из профилированных сопел [2, 5]. Начальный профиль скорости в этом случае — «ударный», с тонкими пограничными слоями. Ламинарно-турбулентный переход в таких течениях происходит достаточно быстро в слое смешения на начальном участке струи [3–4]. Практически аналогично осуществляется истечение газа из отверстия. Истечение же струи из длинной трубки имеет принципиальное отличие: возможно появление больших пульсаций скорости и возникновение вихревых структур внутри трубки в режиме ламинарно-турбулентного перехода [12].

Диффузионный факел часто используется при исследовании реагирующих потоков. В литературе имеется значительное число работ, не только рассматривающих структуру пламени, но и предлагающих анализ различных механизмов неустойчивости реагирующего течения [13, 14].

В [15] приведены результаты исследования диффузионного факела в спутном потоке воздуха со скоростью $U_c = 5$ м/с при истечении топлива (H_2 и C_2H_2) из трубки диаметром $d = 1$ мм. Было, в частности, отмечено, что в ламинарном режиме истечения водорода из трубки горение затягивает переход к турбулентному режиму течения в струе. Так, при среднерасходной скорости $U_m = 106$ м/с ($Re = 1074$) течение в факеле остается ламинарным, тогда как в нереагирующей струе в тех же условиях возникает точка перехода к турбулентности. При увеличении скорости до $U_m = 123$ м/с ($Re = 1237$) в реагирующем потоке, начиная с расстояния $X_T = Z_T/d = 35 \div 40$, образуется область турбулентного течения (здесь Z_T — координата точки ламинарно-турбулентного перехода, отсчитываемая от начала струи). В переходном режиме ($1950 < Re < 2500$) положение точки перехода случайным образом изменяется в диапазоне $X_T \approx 5 \div 20$. В турбулентном режиме истечения топлива ($Re > 2500$) координата перехода к турбулентности стабилизируется на значении $X_T \approx 2 \div 3$.

При горении C_2H_2 динамика перехода к турбулентному режиму течения может быть иной [15]. Область турбулентного течения в факеле появляется при меньшей скорости — $U_m = 16.7$ м/с ($Re = 1853$). С увеличением числа Рейнольдса до $Re = 1950$ реагирующее течение теряет устойчивость. Переход от ламинарного режима к турбулентному и наоборот на-

блюдался по всей длине факела $X_T \approx 2 \div 50$.

Как было показано в [16] на примере горения топливных смесей H_2/N_2 , увеличение диаметра трубки меняет характер динамики положения точки перехода при изменении числа Рейнольдса. В [17] исследовалось влияние состава смеси на режимы реагирующего течения, границы существования ламинарного и турбулентного пламени, условия срыва пламени при горении затопленной струи C_3H_8/N_2 . В частности, отмечалось, что в области перехода к турбулентному течению струи топлива возможен срыв пламени. Разбавление пропана инертными газами CO_2 и N_2 приводит к переходу к режиму отсоединенного пламени при меньших скоростях истечения [18]. Отмечается, что добавление CO_2 вызывает рост амплитуды осцилляций передней кромки пламени и при этом практически не сказывается на их частоте.

Турбулентные пятна, обусловленные природой ламинарно-турбулентного перехода в трубе, могут оказывать воздействие на структуру турбулентного пламени в диффузионном факеле. Так, в [19] образование разрывов во фронте пламени связывают именно с воздействием вихревого образования, возникающего в переходном режиме истечения горючего из трубки.

Метод управления процессами горения за счет ламинарно-турбулентного перехода в струйном источнике (цилиндрической трубе) исследован недостаточно. Особенностью такого режима является использование струй с низкими числами Рейнольдса ($Re < 4000$), что предполагает малые скорости и малые расходы горючего. С другой стороны, такие режимы позволяют получать струи с большой длиной ламинарной зоны [8, 10]. Целью данной работы является экспериментальное исследование гидродинамики и диффузионного горения углеводородных струй в режимах развития неустойчивости как в самом струйном факеле, так и внутри источника формирования струи.

УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе сначала изучается струя без горения (холодная), а затем струя в условиях горения (горячая). В «холодных» опытах использовалась пропан-бутановая смесь (50 % пропана, 50 % бутана). При горении применялся как чистый пропан ($Y = 99.9$ % по объему), так и его смеси с инертным разбавителем (CO_2 , He). Эксперименты проводились при атмосферном

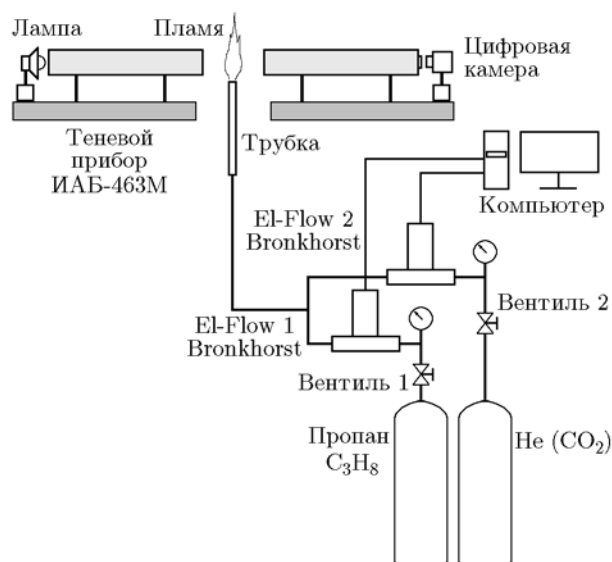


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

давлении и начальной комнатной температуре потока. Экспериментальная установка состояла из баллонов с газом, газовых редукторов и двух расходомеров (рис. 1). Общий расход газов и состав топливной смеси задавался с помощью цифровых расходомеров El-Flow Bronkhorst. Вязкость газовой смеси, необходимая для расчетов, оценивалась по модели Сазерленда в аппроксимации Вильке [20].

В качестве источника струи использовалась трубка из кварца внутреннего диаметра $d = 3.2$ мм, длиной $l = 550$ мм, с толщиной стенки 1.2 мм. Истечение струи смеси газов осуществлялось в воздушное пространство. Газ подводился к рабочему участку с помощью гибких соединительных шлангов. В опытах с горением пропан и инертный разбавитель поступали в тракт через Y-образный тройник. Диапазон скоростей холодной струи в начальном ее сечении на оси составлял $U_0 = 0.2 \div 17$ м/с, при этом число Рейнольдса изменялось в пределах $Re = U_m d / \nu = 200 \div 13\,500$, где ν — кинематическая вязкость газа.

Измерения средней скорости U_0 , среднеквадратичного значения пульсаций скорости u и степени турбулентности Tu в экспериментах с холодной струей выполнены термоанемометром постоянной температуры DISA 55M с использованием измерительной аппаратуры DISA. В качестве датчика применялся миниатюрный зонд DISA 55P11 (золоченый вольфрам, диаметр нити 5 мкм, длина нити 0.6 мм).

Обработку данных термоанемометра проводили по методике [21] в предположении, что чувствительность нити к пульсациям скорости существенно больше, чем к пульсациям плотности. Перемещение зонда термоанемометра осуществлялось с помощью двухступенного координатного устройства с шагом 50 мкм. Температура газа на входе в рабочий участок измерялась цифровым термометром Ebro TFX392L. Для измерения температуры в факеле применялась Pt/Pt-Rh-термопара ТПР-0392-01 с диаметром проводов 120 мкм. Известно, что каталитический эффект на поверхности платиновой термопары в пламени углеводородов может завышать ее показания. С другой стороны, излучение термопарной проволоки охлаждает спай, что занижает показания. В данной работе какой-либо коррекции измерений температуры не проводилось. В диапазоне чисел $Re = 500 \div 13\,500$ погрешность определения основных параметров составляла: средней скорости — $4 \div 6$ %, среднеквадратичного значения пульсаций скорости — $7 \div 9$ %, температуры газа — 0.5 %, массового расхода газа — 0.5 %, числа Рейнольдса — $0.7 \div 1$ %, состава топлива — 0.75 %.

Для экспериментального исследования реагирующих потоков, возмущенных вихревыми структурами, в данной работе использовалась гильберт-оптика (гильберт-визуализация) [22, 23] — высокочувствительный метод визуализации полей оптической плотности. Для этого применялся теневой прибор ИАБ-463М, дополнительно оснащенный гильберт-оптикой (см. рис. 1). Регистрация сдвиговых интерферограмм и видеозапись факела проводились цифровой видеокамерой Canon 650D с частотой съемки 50 с^{-1} .

ИССЛЕДОВАНИЕ ХОЛОДНОЙ СТРУИ

В «холодных» опытах использовалась пропан-бутановая смесь (50 % пропана, 50 % бутана). Известно, что распространение свободных струй существенно зависит от начальных условий [2–4]. Поэтому на первом этапе работы выполнены измерения термоанемометром в выходном сечении канала. На рис. 2 представлена зависимость средней скорости (U_0), среднеквадратичного значения пульсаций скорости (u) и степени турбулентности ($Tu = u/U_0 \cdot 100$ %) на оси канала в зависимости от числа Рейнольдса. Как видно из рисунка, средняя скорость имеет локальный минимум

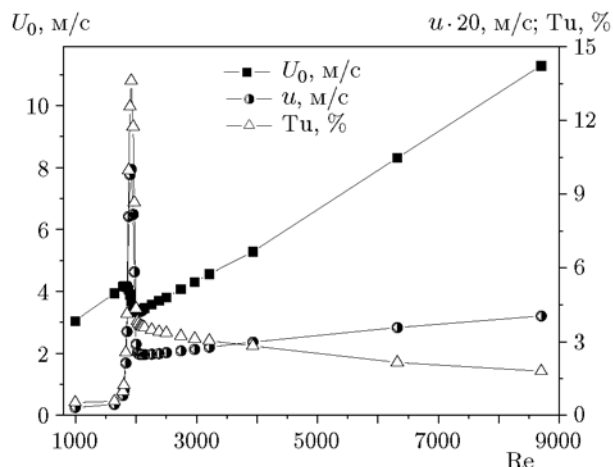


Рис. 2. Зависимость средней скорости, среднеквадратичных пульсаций и степени турбулентности (на оси струи) от числа Рейнольдса на выходе из трубки

в области $Re = 1800 \div 2000$. Такое изменение связано с ламинарно-турбулентным переходом газового потока в трубке. Опыты показали, что распределение скорости в выходном сечении канала изменяется от ламинарного параболического профиля Пуазейля до заполненного профиля, характерного для турбулентного течения. Для среднеквадратичного значения пульсаций скорости и степени турбулентности в области перехода наблюдается локальный экстремум при $Re = 1920$, при этом достигается максимальная степень турбулентности $Tu = 13.6\%$. Изучение осциллограммы сигнала термоанемометра показало перемежающийся во времени характер поведения мгновенной скорости, связанный с наличием турбулентных пятен в области переходных чисел Рейнольдса $Re = 1800 \div 2000$. При $Re > 2000$ характер осциллограмм становится полностью турбулентным. Таким образом, три параметра и перемежающийся характер течения свидетельствуют о наличии ламинарно-турбулентного перехода на выходе из трубки в области $Re = 1800 \div 2000$.

На втором этапе работы выполнены измерения термоанемометром на оси газовой струи вниз по потоку. На рис. 3 представлена зависимость средней скорости на оси струи U_x , нормированной на осевую среднюю скорость в начальном сечении струи U_0 , от безразмерного расстояния x/d при вариации числа Рейнольдса (x — продольная координата, отсчитываемая от начала струи). Общий харак-

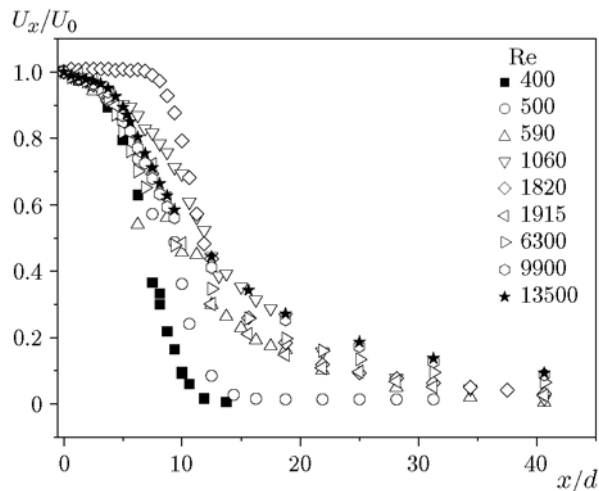


Рис. 3. Средняя скорость на оси струи, нормированная на среднюю скорость в начальном ее сечении, в зависимости от безразмерного расстояния от начала струи при вариации числа Рейнольдса

тер изменения скорости вдоль оси — монотонное снижение относительной скорости U_x/U_0 . Наибольшая перестройка распределения скорости вдоль оси происходит в области чисел Рейнольдса, характерных для ламинарно-турбулентного перехода, $Re = 1800 \div 1915$. При $Re = 1820$ наблюдается самая протяженная зона ламинарного течения.

Изменение среднеквадратичного значения пульсаций скорости и степени турбулентности в зависимости от числа Рейнольдса на оси струи представлено на рис. 4, 5. Можно выделить несколько характерных режимов распространения струи. При $Re < 400$ начальный импульс струи из-за наличия вязкой диссипации постепенно уменьшается вниз по потоку и пульсации скорости монотонно затухают. Такой режим сложен для диагностирования стандартными средствами термоанемометрии из-за большой неопределенности измерений. Для струй с малыми числами Рейнольдса ($Re = 500$) характерна протяженная зона ламинарного течения (до $x/d = 20$) с низким уровнем пульсаций скорости, затем идет область ламинарно-турбулентного перехода, в которой пульсации растут, и далее зона турбулентного течения, где пульсации уменьшаются. С увеличением числа Рейнольдса длина ламинарного участка сокращается, а максимум пульсаций в области перехода возрастает. При $Re = 1820$ длина ламинарной зоны $x/d = 10$, пуль-

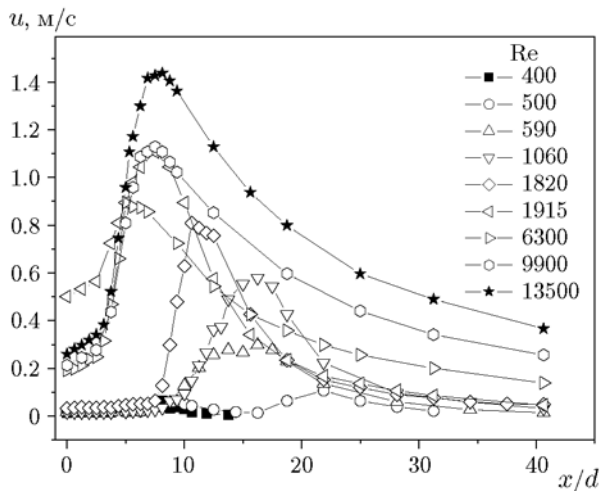


Рис. 4. Изменение среднеквадратичных значений пульсаций продольной скорости на оси струи в зависимости от безразмерного расстояния от начала струи

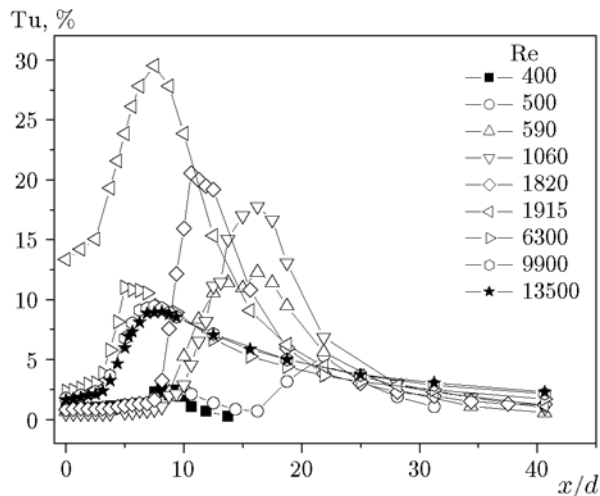


Рис. 5. Степень турбулентности на оси струи в зависимости от безразмерного расстояния от начала струи

саций достигают значения $Tu = 21$ %. При $Re = 1915$ уровень пульсаций скорости в начальном сечении струи резко возрастает. В осциллограмме сигнала термоанемометра регистрируется перемежающийся характер поведения мгновенной скорости, обусловленный наличием турбулентных пятен. Приведенные наблюдения указывают на то, что ламинарно-турбулентный переход происходит уже внутри источника струи (трубки). В результате резко увеличиваются флуктуации в ближнем поле струи (при $x/d = 7$ до значения $Tu =$

30 %). При дальнейшем росте числа Рейнольдса ($Re > 1915$) начальный уровень пульсаций снижается до $Tu_0 = 4$ %, максимум при $x/d = 7$ уменьшается до $Tu = 12$ %. Ниже по течению ($x/d > 7$) наблюдается существенное снижение пульсаций, что свидетельствует о сильной диссипации турбулентной энергии.

Анализируя данные, представленные на рис. 2–5, можно сделать следующие выводы. Существуют четыре характерных режима истечения струи: диссипативный, ламинарный, переходный и турбулентный [24]. Известно, что свободные струи неустойчивы при малых числах Рейнольдса порядка $10 \div 30$ [3, 4]. Однако из-за наличия вязкой диссипации начальный импульс уменьшается и пульсации скорости затухают. Таким образом, для диссипативного режима в диапазоне чисел $Re < 10 \div 30$ характерно отсутствие локальной неустойчивости и пространственной области с ростом пульсаций скорости. Данный режим в нашей работе не изучался.

Внутри трубки при $30 < Re < 1800$ наблюдается ламинарный режим течения, в начальном сечении струи профиль скорости параболический и уровень турбулентности низкий ($Tu < 1$ %). Основным механизмом роста возмущений является неустойчивость струйного течения. По длине струи последовательно расположены три зоны: протяженный участок ламинарного течения, область ламинарно-турбулентного перехода с достаточно высоким уровнем флуктуаций скорости ($Tu > 3 \div 5$ %), зона турбулентного течения с затуханием флуктуаций скорости.

Для переходного режима течения ($1800 < Re < 2000$) характерно формирование двухкаскадного гидродинамического усилителя. Первым каскадом усиления является неустойчивость внутри струйного источника (трубки), вторым каскадом служит неустойчивый механизм самой струи. Этот режим отличается значительным изменением параметров и перемежаемым характером течения по времени. В начальном сечении струи происходит перестройка профиля средней скорости от ламинарного к турбулентному, резко возрастают пульсации скорости (на оси до значения $Tu = 13.6$ %). В ближнем поле струи ($x/d < 10$) изменяется распределение средней скорости вдоль оси, резко увеличиваются пульсации скорости, уровень флуктуаций на оси достигает $Tu = 30$ %. Наблюдается перемежающийся во времени харак-

тер изменения мгновенной скорости, который связан с наличием турбулентных пятен (slug и puff [12]) в области ближнего поля струи.

Для турбулентного режима струи ($Re > 2000$) характерно наличие турбулентного режима течения внутри струйного источника. По длине струи последовательно расположены два участка: зона существенного роста пульсаций скорости и протяженный участок с затуханием флуктуаций скорости. Экстремум в распределении пульсаций скорости на начальном участке струи вызван внутренними процессами турбулентного течения, генерацией турбулентной энергии и турбулентной диффузией.

Опыты с холодной струей демонстрируют следующие возможности управления процессами смешения и горения в струйных течениях при низких числах Рейнольдса ($Re < 4000$). Применение режима ламинарно-турбулентного перехода на практике означает использование малых скоростей и расходов горючего. Струйное истечение из длинных трубок позволяет получать струи с большой длиной ламинарной зоны [8, 10]. Таким образом, в камере сгорания можно получать дальнобойные струи с меньшим расходом топлива.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ

В опытах с диффузионным струйным горением исследовались пламена чистого пропана и горение топливных смесей пропана с инертным разбавителем в интервале чисел Рейнольдса $Re = 300 \div 5000$. Объемная доля пропана Y в смеси с углекислым газом задавалась в диапазоне $30 \div 70$ %. В экспериментах с горением смесей C_3H_8/He объемное содержание горючего изменялось от 38 до 67 %.

Во всем рассмотренном диапазоне скоростей истечения затопленной струи чистого пропана ($U_m = 0.8 \div 9$ м/с) горение сопровождается низкочастотными фликер-колебаниями факела, которые связаны с действием сил плавуности. Полученная по результатам визуализации оценка частоты фликер-колебаний находится в диапазоне $5 \div 14$ Гц, что согласуется с данными [25].

На этом фоне воздействие пульсаций потока, вызванных прохождением турбулентного пятна (ТП), не оказывает сильного влияния ни на стабильность горения, ни на частоту колебаний пламени. На рис. 6 приведены два изображения, полученные при гильберт-визуализации пропановоздушного диффузион-

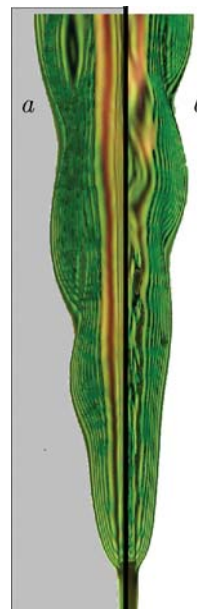


Рис. 6. Горение чистого пропана ($Re = 2700$):

a — ламинарная струя топлива, *б* — момент прохождения турбулентного пятна

ного факела в переходном режиме истечения топлива (течение с перемежаемостью). На рис. 6, *a* представлен кадр, соответствующий ламинарному участку течения, на рис. 6, *б* отображен момент прохождения турбулентного пятна. Форма внешней видимой границы факела в момент прохождения ТП может претерпевать случайные изменения: при переходе к турбулентному течению в струе топлива амплитуда колебания внешнего контура пламени заметно снижается. С появлением ТП переход к турбулентному течению в топливной струе может происходить в любой точке топливной (приосевой) части потока, в то время как само пламя остается, по-видимому, ламинарным. Во всех режимах горения отсоединенного пламени течение топлива за срезом трубки является турбулентным.

На рис. 7 приведены распределения средней температуры вблизи среза трубки и на удалении 10 калибров в тех же условиях, что и на рис. 6. Согласно нашим измерениям в переходном режиме, в диапазоне $Re = 1900 \div 2500$ профили средней температуры в присоединенном пламени пропана остаются практически без изменений.

Как установлено в [17], разбавление пропана инертным газом (в нашем случае рассматривается C_3H_8/CO_2 или C_3H_8/He) может из-

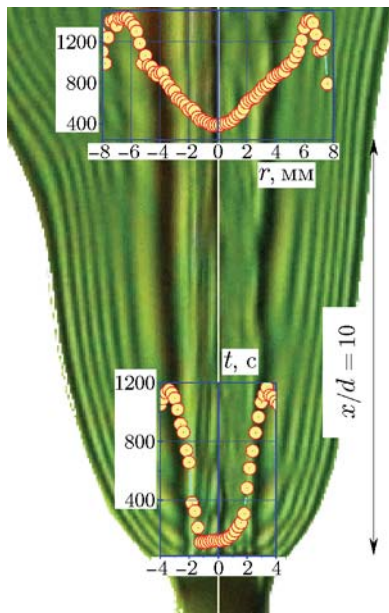


Рис. 7. Распределение температуры в пропановоздушном диффузионном пламени ($Re = 2700$)

менять режим горения. При одном и том же числе Рейнольдса и диаметре трубки уменьшение доли пропана может привести к переходу от присоединенного к приподнятому ламинарному или турбулентному пламени. Здесь имеется в виду турбулентный характер течения в приосевой топливной части потока. Как показали наши наблюдения, воздействие ТП на поток существенно зависит от типа пламени. Временная последовательность кадров, полученная при гильберт-визуализации отсо-

единенного пламени, приведена на рис. 8. Слева направо показана временная последовательность кадров пламени, изменяющегося под воздействием ТП (второй кадр). ТП резко изменяет расстояние от среза трубки до передней кромки пламени X_L . При взаимодействии вихревого ТП с передней кромкой пламени тип пламени может измениться. Последовательность событий на рис. 8 иллюстрирует переход от турбулентного отсоединенного к ламинарному горению. В случае взаимодействия ТП с отсоединенным ламинарным пламенем наблюдался переход к горению с турбулентным струйным ядром. В этот момент времени общая длина факела сокращалась в несколько раз.

Последовательность кадров гильберт-визуализации на рис. 9 иллюстрирует взаимодействие ТП с турбулентным отсоединенным пламенем (второе фото на рис. 9), в результате которого происходит погасание диффузионного факела (последнее фото на рис. 9). По-видимому, воздействие крупномасштабной пульсации привело к формированию в приосевой области охлажденной зоны с низким содержанием топлива (третье фото на рис. 9). Это явление оказалось несовместимым с условиями стабилизации горения и привело к срыву пламени.

Появление ТП в трубке определяется числом Рейнольдса и не зависит от наличия горения. Сам процесс появления ТП случаен, но визуализация позволила наблюдать ряд закономерностей. В переходном режиме имеют место значительные изменения положения пламе-

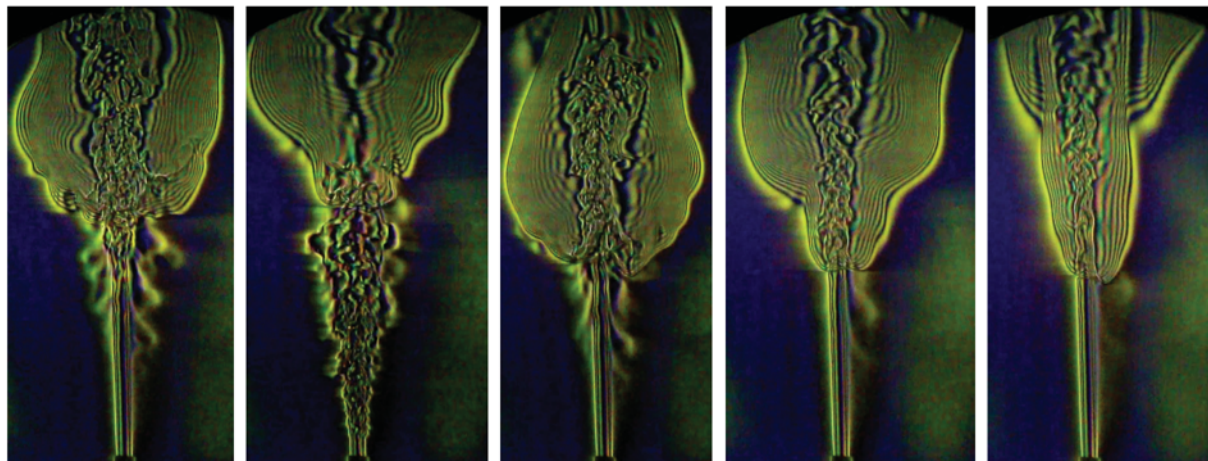


Рис. 8. Обратный переход от турбулентного отсоединенного к ламинарному отсоединенному пламени ($Re = 2924$, C_3H_8/CO_2 , $Y = 46\%$)

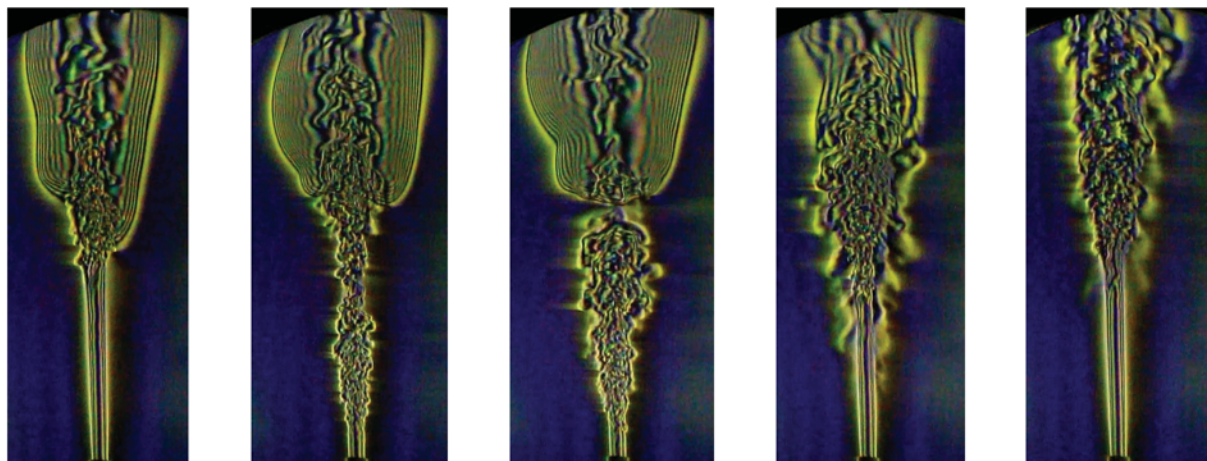


Рис. 9. Срыв пламени в переходном режиме истечения струи C_3H_8/CO_2 ($Re = 2966$, $Y = 46\%$)

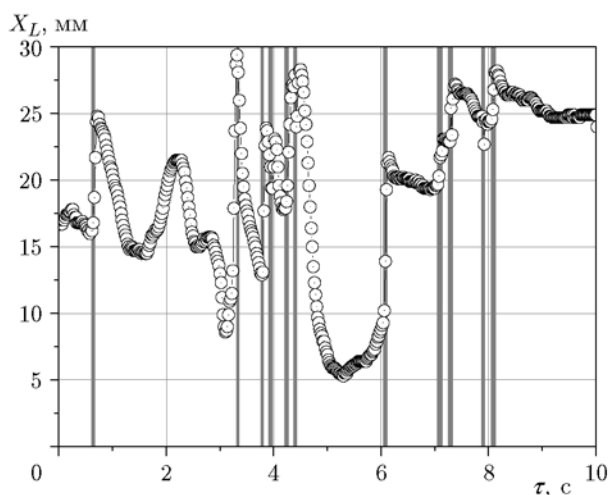


Рис. 10. Положение передней кромки пламени в отсоединенном ламинарном пламени C_3H_8/CO_2 ($Re = 2966$, $Y = 46\%$)

ни X_L относительно среза трубки (рис. 10). Взаимодействие ТП с пламенем сопровождается скачкообразным увеличением расстояния X_L . Моменты взаимодействия ТП с пламенем указаны на рис. 10 вертикальными полосами. Примеры таких событий представлены на рис. 8 (второе фото) и на рис. 9 (второе и третье фото). Предвестником появления ТП может быть приближение передней кромки ламинарного пламени к срезу трубки. Оценки коэффициента перемежаемости ξ (вероятность появления ТП), выполненные на основе анализа гильберт-визуализации, показали, что в рассмотренном режиме течения $\xi \approx 6\%$. При $Re =$

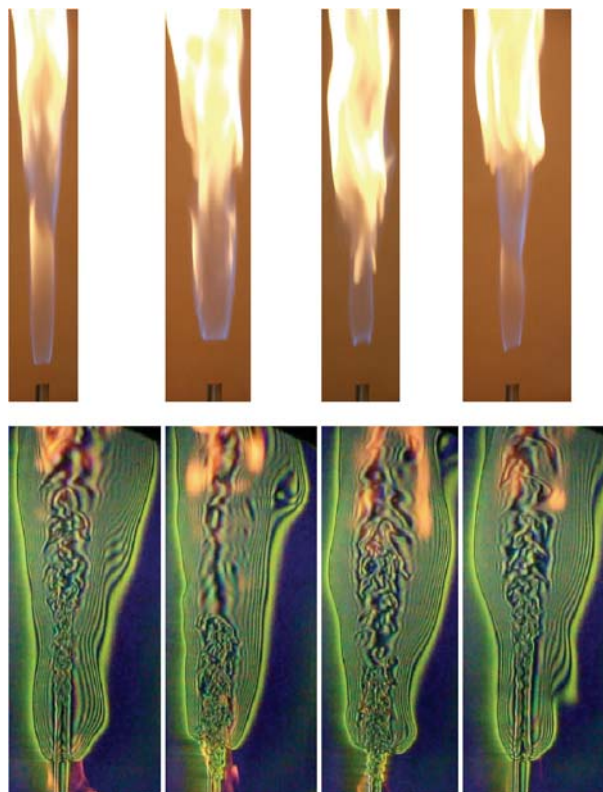


Рис. 11. Отсоединенное ламинарное пламя C_3H_8/He ($Y = 33\%$, $Re = 2611$)

3058, что соответствует отсоединенному турбулентному пламени, значение ξ приближается к 45 %.

Примеры визуализации диффузионного горения C_3H_8/He в переходном режиме истечения из струйного источника показаны на рис. 11. Верхний ряд представляет собой по-

следовательность кадров, полученных при видеосъемке, нижний демонстрирует гильберт-визуализацию. Последовательность приведенных кадров отображает процесс взаимодействия ламинарного отсоединенного пламени с ТП.

ДИСКУССИЯ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наряду с традиционными методами управления процессами смещения и горения, представляется перспективным подход с использованием диффузионного горения в режиме развития неустойчивости как в самом струйном факеле, так и внутри источника формирования струи. В рамках этого подхода проведены экспериментальные исследования гидродинамики и горения дозвуковой струи, истекающей из длинной трубки, в диапазоне чисел Рейнольдса $200 \div 13\,500$. Выполнены измерения средней скорости и пульсаций скорости в ближнем поле пропан-бутановой струи без горения. Эти результаты согласуются с экспериментальными данными, полученными для свободных воздушных струй [8, 10, 11]. На основании опытов с холодной струей установлено два режима — ламинарный и переходный, в которых существует возможность регулирования смещения и горения в области неустойчивости струй при низких числах Рейнольдса ($Re < 4000$). В ламинарном режиме превалирует неустойчивость струйного течения [3, 4], которая открывает возможность управления вихревыми структурами, например, с помощью акустического воздействия [7, 9]. Для переходного режима характерен двухкаскадный механизм неустойчивости, вызванной формированием турбулентных пятен внутри трубы [12] и генерацией вихревых структур в струе [3, 4].

Числа Рейнольдса, характерные для перехода в трубе (как для опытов с холодной струей, так и для опытов с горением), могут отличаться из-за различия профилей скорости и уровня турбулентности на входе в трубу [12]. Переходные режимы в опытах с горением более разнообразные, однако основные режимы течения реализуются как в холодной, так и в горячей струе.

При горении в переходном режиме истечения струи чистого пропана наблюдалось присоединенное ламинарное пламя. При горении смесей C_3H_8 с CO_2 или He в переходном режиме происходило отсоединение пламени от кромки

трубки. Так же как и в случае разбавления пропана азотом [17], уменьшение содержания горючего при фиксированном числе Рейнольдса может привести к образованию отсоединенного пламени. При этом в зависимости от состава топливной смеси и значения Re наблюдалось как отсоединенное ламинарное, так и отсоединенное турбулентное пламя. Визуализация показала, что вихревые структуры (турбулентные пятна), формирующиеся в переходном режиме истечения струи топлива из трубки, оказывают сильное воздействие на отсоединенное пламя. В таких условиях возможен переход от турбулентного режима горения к ламинарному и наоборот. В работе [17] отмечалось, что существует диапазон параметров, зависящий от диаметра трубки, числа Рейнольдса и объемной концентрации пропана, при которых может происходить срыв отсоединенного турбулентного пламени. Наши данные показывают, что погасание в таких условиях связано с воздействием турбулентных пятен, возникающих в переходном режиме течения в трубке, на область распада струи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Nathan G. J., Mi J., Alwahabi Z. T., et al. Impacts of a jet's exit flow pattern on mixing and combustion performance // *Prog. Energy Combust. Sci.* — 2006. — V. 32. — P. 496–538.
2. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй. — М.: Физматгиз, 1960.
3. Ho C. M., Huerre P. Perturbed free shear layers // *Annu. Rev. Fluid Mech.* — 1984. — V. 16. — P. 365–424.
4. Michalke A. Survey on jet instability theory // *Prog. Aerosp. Sci.* — 1984. — V. 21, N 3. — P. 159–199.
5. Турбулентное смещение газовых струй / под ред. Г. Н. Абрамовича. — М.: Наука, 1974.
6. Gau C., Shen C. H., Wang Z. B. Peculiar phenomenon of micro-free-jet // *Phys. Fluids.* — 2009. — V. 21, N 9. — P. 092001-1–092001-13.
7. Литвиненко Ю. А., Грек Г. Р., Козлов В. В., Козлов Г. В. Дозвуковая круглая и плоская макро- и микроструи в поперечном акустическом поле // *Докл. АН.* — 2011. — Т. 436, № 1. — С. 47–53.
8. Леманов В. В., Терехов В. И., Шаров К. А., Шумейко А. А. Экспериментальное исследование затопленных струй при низких числах Рейнольдса // *Письма в ЖТФ.* — 2013. — Т. 39, вып. 9. — С. 34–40.
9. Кривокорытов М. С., Голуб В. В., Моралев И. А. Развитие неустойчивостей в газовых микроструях при акустическом воздействии //

- Письма в ЖТФ. — 2013. — Т. 39, вып. 18. — С. 38–44.
10. **Анискин В. М., Леманов В. В., Маслов Н. А., Мухин К. А., Терехов В. И., Шаров К. А.** Экспериментальное исследование течения дозвуковых плоских мини- и микроструй воздуха // Письма в ЖТФ. — 2015. — Т. 41, вып. 1. — С. 94–101.
 11. **Lemanov V. V., Terekhov V. I., Sharov K. A.** Investigation of the flow in free and impinging air micro- and macrojets // Springer Proc. Phys. — 2016. — V. 185. — P. 29–35.
 12. **Mullin T.** Transition to turbulence in a pipe: a historical perspective // Annu. Rev. Fluid Mech. — 2011. — V. 42. — P. 1–24.
 13. **Kolhe P. S., Agrawal A. K.** Role of buoyancy on instabilities and structure of transitional gas jet diffusion flames // Flow Turbulence Combust. — 2007. — V. 79. — P. 343–360.
 14. **Peters N.** Turbulent Combustion. — Cambridge Univ. Press, 2000.
 15. **Takeno T., Kotani Y.** Transition and structure of turbulent jet diffusion flames // Prog. Astronaut. Aeronaut. — 1978. — V. 58. — P. 19–35.
 16. **Takahashi F., Mizomoto M., Ikai S.** Transition from laminar to turbulent free jet diffusion flame // Combust. Flame. — 1982. — V. 48. — P. 85–95.
 17. **Lee B. J., Kim J. S., Chung S. H.** Effect of dilution on the liftoff of nonpremixed jet flames // Proc. Combust. Inst. — 1994. — V. 25. — P. 1175–1181.
 18. **Briones A. M., Aggarwal S. K.** A numerical investigation of flame liftoff, stabilization, and blowout // Phys. Fluids. — 2006. — V. 18, N 4. — P. 043603–1–043603–13.
 19. **Козулин В. С., Крайнев В. Л., Третьяков П. К., Тупикин А. В.** Особенности диффузионного факела при переходе от ламинарного режима горения к турбулентному // Физика горения и взрыва. — 2014. — Т. 50, № 6. — С. 134–136.
 20. **Рид Р., Шервуд Дж., Праусниц Т.** Свойства газов и жидкостей. — Л.: Химия, 1982.
 21. **Banerjee A., Andrews M. J.** A convection heat transfer correlation for a binary air-helium mixture at low Reynolds number // J. Heat Transfer. — 2007. — V. 129, N 11. — P. 1494–1505.
 22. **Dubnischchev Yu. N., Arbuzov V. A., Arbuzov E. V., Berdnikov V. S., Melekhina O. S., Shlapakova E. O.** Visualization of convective structures by methods of the hilbert optics and phase-shift interferometry // 10th Pacific Symp. on Flow Visualization and Image Processing Naples. — 2015. — Paper ID:105.
 23. **Арбузов В. А., Арбузов Е. В., Дворников Н. А., Дубнищев Ю. Н., Нечаев В. Г., Шлапакова Е. О.** Оптическая диагностика взаимодействия кольцевых вихрей с пламенем // Автометрия. — 2016. — № 2. — С. 66–72.
 24. **Viskanta R.** Heat-transfer to impinging isothermal gas and flame jets // Exp. Therm. Fluid Sci. — 1993. — V. 6, N 2. — P. 111–134.
 25. **Hamins A., Yang J. C., Kashiwagi T.** An experimental investigation of the pulsation frequency of flames // Proc. Combust. Inst. — 1992. — V. 24. — P. 1695–1702.

Поступила в редакцию 1/IX 2017 г.