

03

## **Влияние внешнего периодического возбуждения на закрученное поднятое пламя**

© С.В. Алексеенко, В.М. Дулин, Ю.С. Козорезов, Д.М. Маркович

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет  
E-mail: dmark@itp.nsc.ru

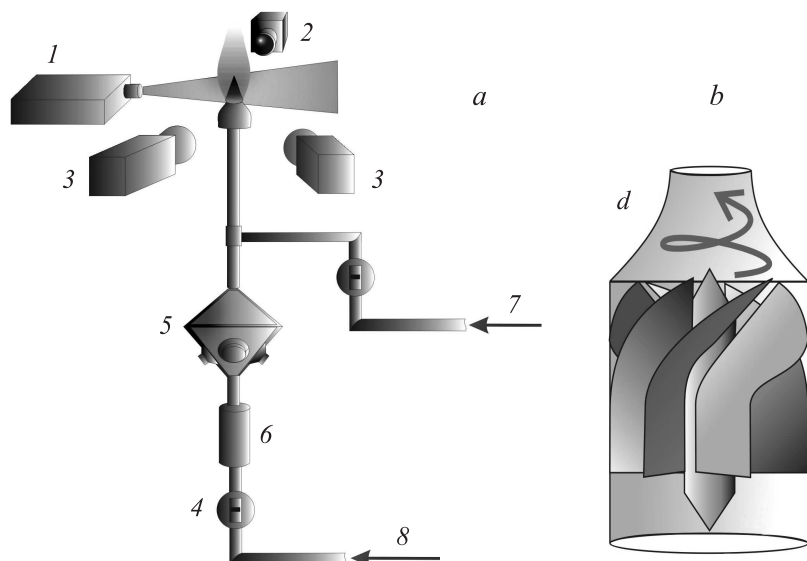
Поступило в Редакцию 4 октября 2010 г.

Показана эффективность одновременного использования активного и пассивного методов управления струйными течениями (наложения внешних осцилляций на начальную скорость потока и закрутки) для повышения интенсивности турбулентного горения в газофазном факеле и подавления нестационарных эффектов (прецессии вихревого ядра). Для исследования структуры потока использовался бесконтактный оптический метод PIV (Particle Image Velocimetry). Для анализа осредненной структуры области интенсивного турбулентного горения использовалась высокочувствительная цифровая камера, оснащенная оптическим фильтром для регистрации интенсивности хемилюминесценции радикала  $\text{CH}^*$ .

Турбулентные реагирующие струйные течения широко распространены в различных технических приложениях: в камерах сгорания, в ракетных и газотурбинных двигателях, при сжигании попутного газа и т.п. Хорошо известно, что при сильной закрутке струи имеет место распад вихревого ядра (см. [1]), для которого характерно наличие крупномасштабных вихревых структур (КВС) спиральной пространственной формы [2] и, как следствие, высокий уровень турбулентных пульсаций. Закрутка потока является эффективным методом управления структурой изотермических и реагирующих струй, что на практике часто используется для стабилизации пламени [3]. Также хорошо известно, что наложение дополнительных осцилляций на начальную скорость потока может быть использовано как эффективный метод управления кольцевыми КВС, формирующимися на начальном участке незакрученных и слабозакрученных струй. Такое активное возбуждение струи может быть использовано как для увеличения, так и для умень-

шения интенсивности турбулентного переноса на начальном участке. До недавнего времени считалось, что сильнозакрученная струя с распадом вихревого ядра практически не чувствительна к наложению дополнительных осцилляций [4]. Однако в работе [5] впервые была продемонстрирована возможность управления структурой сильнозакрученной турбулентной струи в случае воздействия на нее в определенном частотном диапазоне и с амплитудой, превышающей некоторый порог. В [5] показано, что одновременное использование возбуждения и закрутки имеет больший потенциал повышения интенсивности турбулентного переноса на начальном участке струи.

Данная работа направлена на экспериментальное исследование возможности одновременного использования активного и пассивного воздействия (периодического возбуждения и закрутки) для увеличения интенсивности горения предварительно перемешанных компонентов газофазного топлива в турбулентном факеле. Эксперименты проводились на открытой модельной горелке, схема которой представлена на рис. 1, *a*. В качестве горелочного насадка использовалось профилированное сопло с выходным диаметром  $d$ , равным 15 мм. Для закрутки потока во внутреннюю область сопла помещался завихритель (рис. 1, *b*), при этом число закрутки  $S$ , определяемое на базе его геометрических характеристик (см. [3]), равнялось 1.0. Такая интенсивность закрутки была задана для реализации потока с распадом вихревого ядра и для сохранения общности с предыдущими исследованиями [5]. В качестве топлива использовался пропан, в качестве окислителя — атмосферный воздух. Расходы компонентов смеси контролировались при помощи системы расходомеров. Коэффициент стехиометрии (избытка топлива), определяемый как отношение мольной доли топлива в подаваемой смеси к мольной доле для ее стехиометрического состава, с учетом 21% объемного содержания кислорода в воздухе, равнялся  $\Phi = 2.5$ . Это значение соответствует приблизительно 11% объемной концентрации пропана в воздухе. Число Рейнольдса, построенное на базе среднерасходной скорости воздуха  $U_0$  (4.7 м/с), диаметра сопла  $d$  и вязкости воздуха, равнялось 4100. Выбор концентрации пропана и характерного числа Рейнольдса обуславливался реализацией поднятого (подвешенного, отсоединенного) сильнозакрученного пламени. Визуализация показала, что отрыв фронта пламени от кромки сопла происходит при  $Re_{air}$  выше  $2 \cdot 10^3$ , а режим с поднятым пламенем сменяет режим с горением внутри зоны рециркуляции при концен-



**Рис. 1.** *a* — схема экспериментальной установки: 1 — импульсный лазер, 2 — высокочувствительная ПЗС камера с ЭОП, 3 — ПЗС-камеры, 4 — контроллер расхода, 5 — система возбуждения, 6 — система засева, 7 — подача пропана, 8 — подача воздуха. *b* — схема соплового блока с завихрителем для организации закрутки.

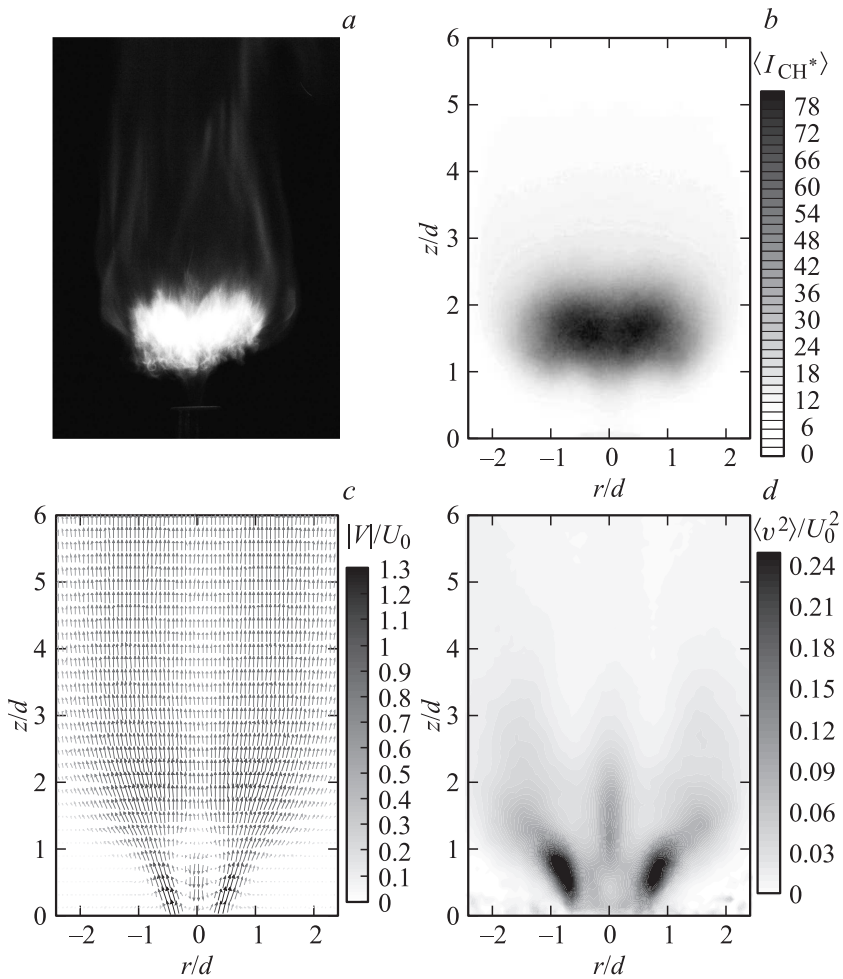
трации газа, превышающей пределы воспламеняемости для однородной пропановоздушной смеси. Для внешнего периодического возбуждения струи использовалась система из четырех акустических динамиков (аналогичная система описана в работе [6]), параллельно подключенных к усилителю и генератору синусоидального сигнала. Мощность, подаваемая на динамики, контролировалась цифровым вольтметром и амперметром. Нормированная частота возмущения, т. е. число Струхала  $St = fd/U_0$  ( $f$  — частота воздействия) варьировалась от 0.1 до 3.

Для измерения мгновенных полей скорости использовалась PIV (Particle Image Velocimetry) система „ПОЛИС“ в стереоскопической конфигурации. Система состояла из сдвоенного Nd:YAG импульсного лазера (длительность импульса 70 мДж составляла менее 10 нс), двух ПЗС-камер (разрешение  $2048 \times 2048$  pix, экспозиция 128 мс) и син-

хронизатора. Время между парой импульсов, определяющее смещение освещаемых трассеров между изображениями, равнялась  $50 \mu\text{s}$ . Так как экспозиция камер существенно превышала длительность лазерного импульса, освещавшего трассерные частицы в измерительной плоскости, камеры оснащались узкополосными оптическими фильтрами, пропускавшими излучение лазера ( $532 \text{ nm}$ ) и подавлявшими свечение пламени. Калибровка камер, т.е. определение дисторсии изображений, вследствие поворота камер в стереоскопической конфигурации, осуществлялась автоматически (см. [7]). Для формирования лазерного „ножа“ использовались фокусирующая и цилиндрическая линзы. Измерения проводились в центральной плоскости пламени, и толщина „ножа“ в измерительной области составляла  $0.8 \text{ mm}$ . Поток засеивался частицами оксида титана (средний диаметр  $1 \mu\text{m}$ , что соответствует времени релаксации частиц  $10 \mu\text{s}$ ). Для каждого режима горения было рассчитано 1500 мгновенных трехкомпонентных полей скорости. Для этого PIV-изображения обрабатывались при помощи итерационного кросскорреляционного алгоритма с деформацией изображения и конечным размером расчетной области  $32 \times 32 \text{ pix}$  и 50% перекрытия [8]. Вследствие неравномерного засева потока трассерами использованный алгоритм учитывал количество частиц в каждой расчетной области (см. [9]). На основе мгновенных полей скорости были рассчитаны пространственные распределения средней скорости и интенсивности турбулентных пульсаций. В работе [9] представлены результаты анализа точности данной стерео PIV системы при измерении скорости в ламинарном пламени бунзеновской горелки с тем же выходным диаметром, что и в данной работе.

Для определения средней интенсивности турбулентного горения в факеле использовалась интенсифицированная ПЗС камера „Наногейт-2“ на базе электронно-оптического преобразователя. Разрешение камеры составляло  $1388 \times 1038 \text{ pix}$ , экспозиция —  $100 \mu\text{s}$ . Для регистрации хемилюминесценции радикалов  $\text{CN}^*$  (500 изображений) камера была оснащена узкополосным оптическим фильтром ( $430 \pm 5 \text{ nm}$ ).

На рис. 2, а представлена фотография режима исследованного закрученного поднятого пламени под влиянием внешнего периодического возбуждения. Амплитуда воздействия, определяемая как среднее значение продольных пульсаций на срезе сопла при возбуждении потока без горения и завихрителя, составляла  $a_f = 30\%$  от  $U_0$ . Без внешнего возбуждения интенсивность пульсаций  $a_0/U_0$  составляла 0.06. В работе



**Рис. 2.** Фотография режима горения (*a*) и измеренные пространственные распределения: *b* — средней интенсивности хемилюминесценции радикала  $\text{CH}^*$ , *c* — средней скорости, *d* — радиальной компоненты кинетической энергии турбулентности сильнозакрученного поднятого пламени при  $\text{Re}_{air} = 4100$ ,  $\Phi = 2.5$ ,  $S = 1.0$  при периодическом возбуждении с числом Струхала  $\text{St} = 0.6$  и амплитудой  $a_f/U_0 = 0.3$ .

показан случай наложения дополнительных осцилляций на начальную скорость потока для числа Струхала  $St = 0.6$  ( $f = 170$  Hz), которое обеспечивает наиболее выраженный эффект. В процессе визуализации было установлено, что основание (нижняя поверхность) фронта пламени располагалось на расстоянии, несколько меньшем одного калибра от кромки сопла. Ниже по потоку, как видно из пространственного распределения осредненной интенсивности свечения радикала  $\text{CH}^*$  на рис. 2, *b*, присутствовала зона интенсивного турбулентного горения, вплоть до расстояния  $\approx 2.5d$ . На фотографии (рис. 2, *a*) можно наблюдать, что далее располагается область догорания содержащих пропан продуктов горения при перемешивании с окружающим воздухом. Из распределений  $\text{CH}^*$  (случай без воздействия не показан), было установлено, что высокоамплитудное возбуждение (при  $a_f$  более  $\approx 25\%$ ) приводит к увеличению интенсивности горения на начальном участке закрученного поднятого пламени, кроме того, наблюдалось значительное снижение сажеобразования в области догорания. На рис. 2, *c* и *d* показаны пространственные распределения средней скорости и радиальной компоненты кинетической энергии турбулентности для рассматриваемого пламени. В предыдущих исследованиях сильнозакрученной изотермической струи [5] и поднятого пламени [9] без воздействия было показано, что для потока с такой степенью закрутки характерны распад вихревого ядра, возникновение зоны рециркуляции и интенсивные крупномасштабные вихревые структуры. Характер распределений мгновенной скорости в работах [9,5] указывает на наличие прецессии вихревого ядра струи, что также подтверждается высокими значениями радиальных пульсаций в области критической точки зоны рециркуляции (интенсивность пульсаций достигала  $0.45 U_0$ ). В данной работе при периодическом возбуждении с  $St = 0.6$  и  $a_f/U_0 = 0.3$  на распределениях скорости наблюдались значительное изменение пространственной структуры крупномасштабных вихрей (не показано в статье) и существенное подавление прецессии вихревого ядра. Распределения  $\langle v^2 \rangle$  на рис. 2, *d* указывают, что на оси симметрии, вблизи сопла ( $z/d = 0.5$ ) интенсивность радиальных пульсаций уменьшается до 20%. Кроме того, на основе анализа распределения средней скорости можно сделать вывод об уменьшении интенсивности возвратного течения по сравнению со случаем без внешнего периодического воздействия (см. [9]).

Основным выводом по результатам данной работы является экспериментальное установление факта, что аналогично изотермическим струйным течениям [5] одновременное использование сильной закрутки и периодического возбуждения позволяет эффективно влиять на структуру течения в газофазном факеле. В частности, показано, что активное управление сильнозакрученным поднятым пламенем позволяет повысить интенсивность турбулентного горения, а также обеспечить подавление прецессии вихревого ядра потока, что актуально с точки зрения снижения вероятности негативных резонансных явлений в камерах сгорания.

Данная работа была выполнена при поддержке Федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009–2013 годы.

## Список литературы

- [1] *Алексеенко С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л.* Введение в теорию концентрированных вихрей. Новосибирск: Ин-т теплофизики, 2003.
- [2] *Cala C.E., Fernandes E.C., Heitor M.V., Shtork S.I.* // *Exp. Fluids*. 2005. V. 40. P. 267–276.
- [3] *Гунта А., Лили Д., Сайред Н.* Закрученные потоки. М.: Мир, 1987.
- [4] *Gallaire F., Rott S., Chomaz J.-M.* // *Phys. Fluid*. 2004. V. 16. P. 2907–2917.
- [5] *Alekseenko S.V., Dulin V.M., Kozorezov Yu.S., Markovich D.M.* // *Int. J. Heat and Fluid Flow*. 2008. V. 29. P. 1699–1615.
- [6] *Broze G., Hussain F.* // *J. Fluid Mech*. 1996. V. 311. P. 37–71.
- [7] *Маркович Д.М., Токарев М.П.* // Вычислительные методы и программирование. 2008. Т. 9. С. 311–326.
- [8] *Токарев М.П., Маркович Д.М., Бильский А.В.* // *Выч. технологии*. 2007. Т. 2. С. 1–23.
- [9] *Дулин В.М., Козорезов Ю.С., Маркович Д.М., Токарев М.П.* // *Вестник НГУ. Сер. Физ.* 2009. Т. 4. С. 30–42.