

Гильберт-диагностика пламён

Ю.Н. Дубнищев^{1,2}, В.А. Арбузов^{1,2}, В.В. Лукашов¹, В.В. Леманов¹
 dubnistchev@itp.nsc.ru | arbuzov@itp.nsc.ru | luka@itp.nsc.ru | lemanov@itp.nsc.ru

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе

Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН), Новосибирск, Россия;

² Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), Новосибирск, Россия

Обсуждается исследование пламени методами гильберт-оптики. Адаптированная к изучению проблем горения диагностика основана на визуализации фазовых возмущений, индуцированных в зондирующем световом поле исследуемой средой, путём использования оптических преобразований Гильберта и Фуко–Гильберта. Диагностический комплекс реализован на основе серийного прибора ИАБ–462М, в котором применяется специально разработанный модуль гильберт-фильтрации, сопряжённый с источником освещения. Исследовалось диффузионное горение струй пропана и водорода. Выявлено влияние на динамическую структуру и эволюцию факела со стороны локальных турбулентных возмущений (puff, slug). Эти возмущения случайно возникают в трубке, формирующей струю, режимах течения соответствующих ламинарно-турбулентному переходу в трубке.

Ключевые слова: оптическая диагностика потоков, струйное пламя, контроль горения, вихревые структуры.

Hilbert-diagnostics of flames

Yu.N. Dubnishchev^{1,2}, V.A. Arbuzov^{1,2}, V.V. Lukashov¹, V.V. Lemanov

dubnistchev@itp.nsc.ru | arbuzov@itp.nsc.ru | luka@itp.nsc.ru | lemanov@itp.nsc.ru

¹ Kutateladze Institute of Thermophysics

Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia;

² Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The flame investigation by Hilbert-optics methods is discussed. The diagnostics adapted to the study of combustion problems is based on visualization of the phase perturbations induced in the sounding light field by the medium under study, using the optical Hilbert and Foucault-Hilbert transformations. The diagnostic complex is implemented on the basis of the device IAB-462M, which uses a specially developed Hilbert filtering module, conjugated with the light source. The combustion of propane and hydrogen jets was investigated. The influence on the dynamic structure and evolution of the torch from the side of local turbulent perturbations (spots, puff) is revealed. These perturbations occur accidentally in the tube forming the jet, under different burning conditions, depending on the dilution of the burning gas with an inert gas.

Keywords: optical flow diagnostics, jet flame, combustion control, vortex structures.

1. Введение

Оптическая диагностика потоков давно и успешно применяется в экспериментальной гидро- и газодинамике. Она отличается многообразием методов и средств, которые составляют современный арсенал исследователя [1]. Большой потенциал развития и применения имеет гильберт-диагностика потоков (HFV – Hilbert Flow Visualization) [2, 3]. Она основана на визуализации пространственно-временных фазовых возмущений, индуцированных в световом поле исследуемой средой путём формирования гильберт-сопряжённого оптического сигнала.

Целью работы является адаптация методов гильберт-оптики к задачам диагностики пламён. Мотивация следует из научной и практической значимости этой проблемы, которая заключается в поиске методов тонкого управления пространственно-временными и термодинамическими параметрами струйного горения [4]. Струйное диффузное горение в режимах контролируемого развития неустойчивости внутри и вне источника формирования струи является одним из таких перспективных методов. Сложность эксперимента заключается в необходимости обеспечения высокочувствительной визуализации полей фазовой оптической плотности газовой среды,

возмущённой вихревыми структурами и температурными градиентами.

2. Описание экспериментальной установки

Комплекс оптической диагностики был создан на основе серийного теневого прибора ИАБ–463М [www.skb-photon], в котором использовался специально разработанный для целей эксперимента модуль оптической гильберт-фильтрации и источник освещения.

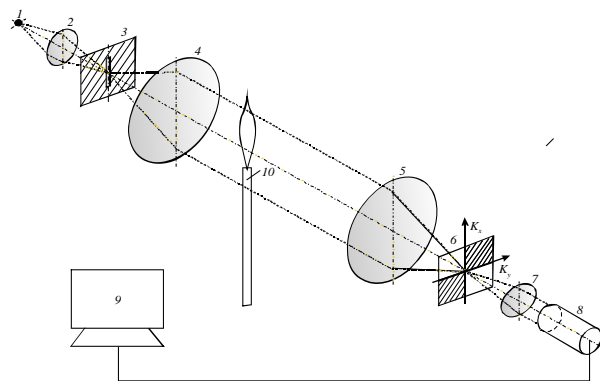


Рис. 1. Схема гильберт-визуализатора.

На рис. 1 показана упрощённая схема гильберт-визуализатора. Схема содержит осветительный модуль, состоящий из источника света 1, коллиматорной линзы 2 и щелевой диафрагмы 3. Щелевая диафрагма расположена в передней фокальной плоскости объектива 4, формирующего зондирующее поле. Фурье-спектр фазовых возмущений, индуцируемых в исследуемой среде, формируется объективом 5 в частотной плоскости, где помещён квадрантный гильберт-фильтр 6. Объектив 7 выполняет обратное фурье-преобразование фильтрованного светового поля, визуализируя его фазовые возмущения, которые регистрируются цифровой видеокамерой 8, подключенной к компьютеру 9. Этот оптический комплекс реализован на базе теневого прибора ИАБ-463М с модифицированным световым источником, модулями гильберт-фильтрации оптического сигнала и регистрации изображения. Для интерферометрических исследований используется модифицированный интерферометр сдвига.

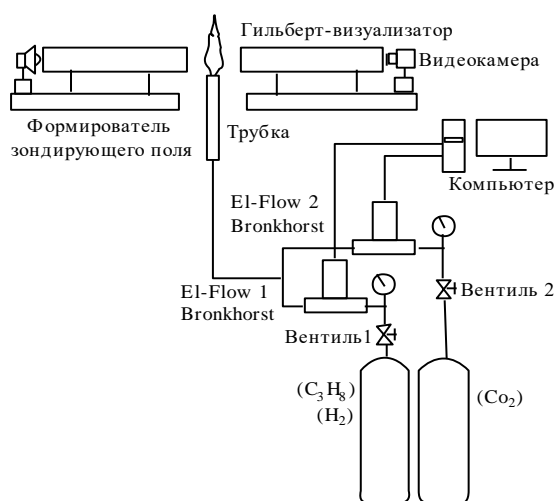


Рис. 2. Схема экспериментального стенда.

Когерентная передаточная функция пространственно-частотного фильтра 6, выполняющего одномерное преобразование Фуко-Гильберта [3], описывается выражением

$$H(K_x, K_y) = \cos\varphi - i\sin\varphi \operatorname{sgn} K_x. \quad (1)$$

Фазовый сдвиг φ является функцией длины волны λ зондирующего светового поля: $\varphi = \varphi(\lambda)$. В частотной плоскости для фурье-спектра фазовой оптической плотности светового поля, возмущённого исследуемой средой (пламенем) имеем, с учётом (1):

$$H(K_x, K_y) s(K_x, K_y) = s(K_x, K_y) \cos\varphi + \hat{s}_x(K_x, K_y) \sin\varphi, \quad (2)$$

где

$$\hat{s}_x(K_x, K_y) = -i \operatorname{sgn} K_x s(K_x, K_x). \quad (3)$$

Энергетический спектр оптического сигнала непосредственно за фильтром 6, с учётом (1)

$$|H(K_x, K_y) s(K_x, K_y)|^2 = \cos^2\varphi |s(K_x, K_y)|^2 + \cos^2\varphi |\hat{s}_x(K_x, K_y)|^2. \quad (4)$$

Объектив 7 выполняет обратное фурье-преобразование фильтрованного сигнала (2):

$$E(x, y) = s(x, y) \cos\varphi + \hat{s}_x(x, y) \sin\varphi \leftrightarrow s(K_x, K_x) \cos\varphi + \hat{s}_x(K_x, K_x) \sin\varphi. \quad (5)$$

Интенсивность сигнала (5) регистрируется фотоматрицей камеры 8:

$$I(x, y) = \rho \{ |s(x, y)|^2 \cos^2\varphi + |\hat{s}_x(x, y)|^2 \sin^2\varphi \}, \quad (6)$$

где ρ – коэффициент, учитывающий чувствительность фотоматрицы. На длине волны $\lambda = \lambda_0$, удовлетворяющей

условию $\varphi(\lambda_0) = \pi/2$, фурье-фильтр выполняет одномерное преобразование Гильберта. Гильберт-преобразование обладает свойствами квазидифференцирования. Поэтому экстремумы и градиенты фазовой оптической плотности исследуемой среды трансформируются в визуализированные структуры гильберт-полос. Пространственное распределение гильберт-полос несёт информацию о возмущениях фазовой оптической плотности, индуцированных вихревыми структурами в реагирующих потоках.

На рисунке 2 показана упрощённая схема экспериментального стенда. Эксперименты проводились при атмосферном давлении и начальной комнатной температуре потока. Экспериментальная установка состояла из баллонов с газом, газовых редукторов и двух расходомеров. Общий расход газов и состав топливной смеси задавался с помощью цифровых расходомеров EI-Flow Bronkhorst. 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.

3. Результаты

На рис. 3 представлена временная последовательность кадров гильберт-визуализации горения смеси C_3H_8/CO_2 , истекающего в неподвижную атмосферу. Время между ближайшими номерами кадров составляет 1/50 с. При числе Рейнольдса $Re = 3476$ внутри источника факела (в трубке) в результате процесса ламинарно-турбулентного перехода в режиме перемежаемости формируются турбулентные пятна (puff) [5].

На кадрах №703–704 представлены изображения отсоединённого ламинарного пламени (в этом интервале времени турбулентные пятна отсутствовали). Начиная с кадра 705 наблюдается развитие турбулентных пятен в потоке факела. На рисунке зарегистрирован случай прохождения puff, который привёл к полному погасанию пламени (кадр 711). Для условий представленного опыта, примерно в 3–5 процентах случаев возникает ситуация, приводящая к распаду струи топлива и полному погасанию факела. По-видимому, режим погасания связан с параметром перемежаемости и уровнем флуктуаций скорости в турбулентных пятнах. Дальнейшее увеличение Re приводит к стабилизации горения.

Как установлено в [5], разбавление пропана инертным газом (в нашем случае рассматривается C_3H_8/CO_2 или C_3H_8/He) может изменять 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.

Примеры визуализированных структур приподнятого (отсоединённого) пламени, приведены на рисунке 4. Слева направо показана временная последовательность изображений пламени, изменяющегося под воздействием ТП. Момент воздействия турбулентного пятна зафиксирован на втором кадре.

На рисунке 5 приведена визуализация факела, иллюстрирующая горение чистого пропана ($Re = 2700$). Это два изображения (а, б), полученные при гильберт-визуализации пропано-воздушного диффузионного факела в переходном режиме истечения топлива в подводящей трубке (течение с перемежаемостью). На рисунке 5а представлен кадр, соответствующий ламинарному участку течения, на рисунке 5б отображён момент прохождения турбулентного пятна (течение снизу вверх).

Также были проведены опыты для горения смеси H_2/CO_2 , истекающей из кварцевой трубки в атмосферу воздуха. Как известно, свойства водорода сильно отличаются от теплофизических и химических свойств углеводородов – H_2 имеет низкую плотность, высокие значения коэффициента диффузии и, как следствие, высокую скорость распространения пламени.

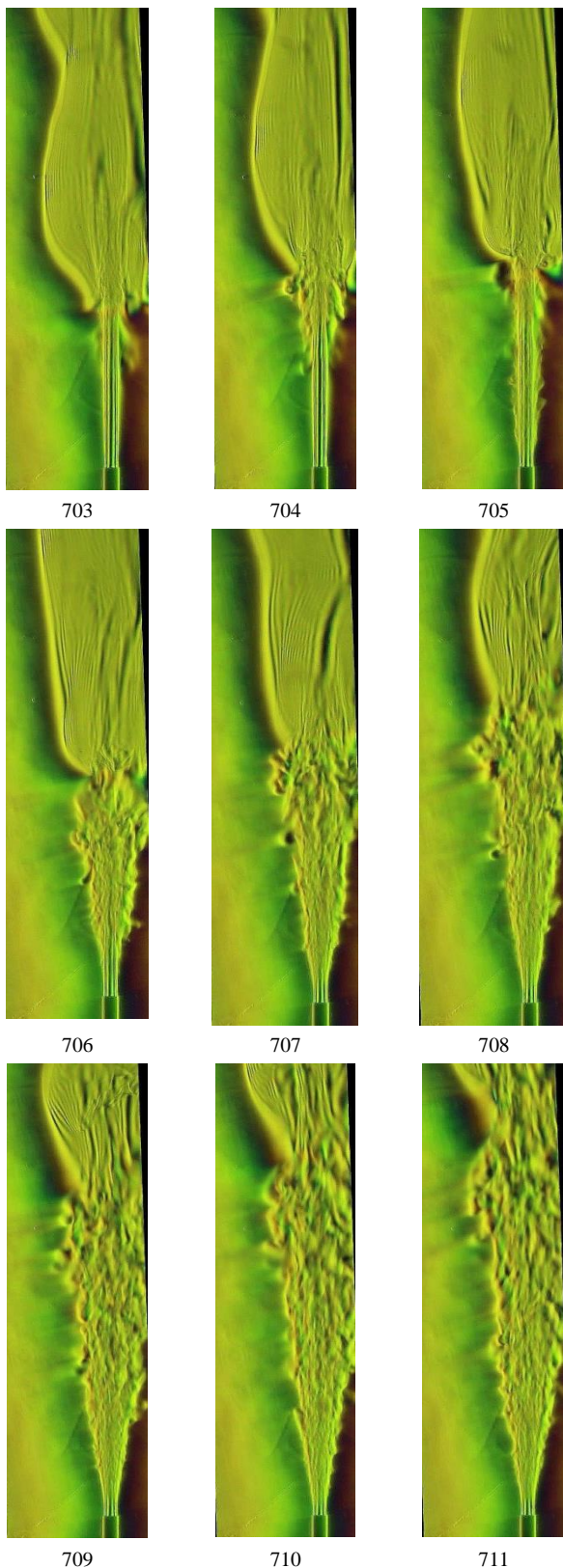


Рис. 3. C_3H_8/CO_2 , $XC_3H_8=39\%$, $Re=3476$, $d=3.2$ мм,

струя снизу вверх

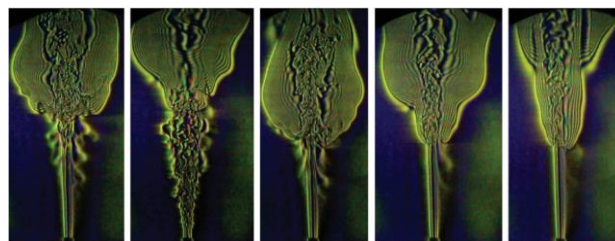


Рис. 4. Визуализированные структуры приподнятого (отсоединённого) пламени.



Рис. 5. Горение чистого пропана.

Это не может не сказываться на различиях в реакции пламени на появление в топливной струе турбулентных пятен в переходном режиме течения в трубке.

Опыты проведены для горения смеси (H_2/CO_2), истекающей из кварцевой трубки диаметром $d=3.2$ мм и длиной $l=550$ мм, в атмосферу воздуха. Течение направлено снизу вверх. На рисунке б представлена гильберт-визуализация течения с частотой 50 Гц. Цифры под рисунками обозначают номер кадра видеоплёнки при постоянном числе Рейнольдса $Re=2971$.

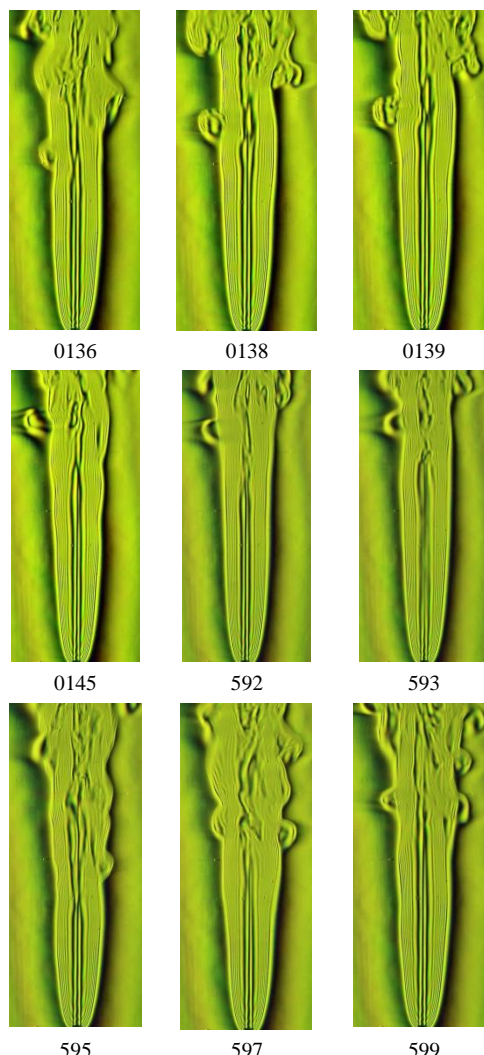


Рис. 6. H_2/CO_2 , $X_{H_2}=57\%$, $Re=2971$, $d=3.2$ mm

Факел имеет две характерных области: а) струйное ядро с поперечным размером порядка диаметра трубки; б) внешнюю часть – с поперечным размером существенно больше d . Внутри источника факела (в трубке) случайным образом формируются турбулентные пятна (puff) как следствие ламинарно-турбулентного перехода. Горение водородного топлива сопровождается наличием возмущений как в ядре, так и на периферии факела. На внешней границе факела, в условиях опыта, практически подавляются низкочастотные фликер-колебания. Вместо них наблюдаются уединённые возмущения, которые возникают при прохождении вихревых структур (puff) вдоль ядра факела. В данном случае в ламинарном пламени возможно появление отдельных микропламен, отрывающихся от основного тела факела (кадры 0139 и 0145).

4. Заключение

В работе представлено исследование диффузионного пламени методами гильберт-оптики. Основным инструментарием являлось использование оптических преобразований Гильберта и Фуко-Гильберта. В плане исследования физических процессов главное внимание уделено механизму взаимодействия трубной и струйной неустойчивости. Струйное диффузное горение на режимах контролируемого развития неустойчивости внутри и вне источника формирования струи является одним из перспективных методов управления пламенем. Для изучения диффузионного горения использовались пропан и водород в смеси с инертным разбавителем (CO_2). Опыты проведены при истечении дозвуковой газовой струи в воздушное пространство из длинной трубки в диапазоне чисел Рейнольдса 2000–4000, характерных для ламинарно-турбулентного перехода в трубах. В этом интервале чисел Рейнольдса для диффузионного факела обнаружен механизм двухкаскадной неустойчивости, вызванной формированием турбулентных пятен (puff) внутри трубы (1-и каскад) [5] и генерацией вихревых структур в слое смещения струи (2-и каскад) [6]. Эти организованные структуры (puff) оказывают сильное воздействие как на изотермическую струю [7-9], так и на пламя. С помощью puff можно управлять как низкочастотными фликер-колебаниями, так и высокочастотными модами в присоединенной зоне факела. Показана возможность перевода присоединенного пламени в отсоединенное и обратно. Puff могут как инициировать переход к турбулентному факелу, так и приводить к его ламинаризации. Зарегистрирована динамика погасания отсоединенного пламени. Сам механизм погасания, по-видимому, связан с параметром перемежаемости и уровнем флуктуаций скорости в турбулентных пятнах

5. Благодарности

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 17-08-00958), в части измерений условий возникновения puff на выходе из трубы выполнены за счет средств, полученных от ФАНО России. Авторы благодарны Абдрахманову Р.Х., Шарову К.А. за помощь при проведении экспериментов.

6. Литература

[1] Smits A, Lim T. Flow Visualization. Techniques and Examples. Imperial College Press. 2000 London: 306 p.

- [2] Арбузов В.А., Дубнищев Ю.Н. Методы гильберт-оптики в измерительных технологиях. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. 316 с.
- [3] Arbutov V.A, Dvornikov N.A, Dubnischchev Yu.N, Nechaev V.G, Novosyolova O.N, Shlapakova E.O (2016) Mint: Hilbert Diagnostics of Vortex Rings Induced in Air by a Pressure Pulse on a Hole. International Journal of Spray and Spray and Combustion Dynamics 2016;8(3): 197–204. DOI: 10.116j.
- [4] Литвиненко Ю. А. Устойчивость дозвуковых макро- и микроструйных течений и микроструйное горение (обзор) // Сибирский физический журнал. 2017. Т. 12, № 3. С. 83–99. DOI 10.25205/2541-9447-2017-12-3-83-99.
- [5] Mullin T. 2011 Experimental studies of transition to turbulence in a pipe. Annu. Rev. Fluid Mech. 42 1–24
- [6] 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.
- [7] Ho C.M and Huerre P. 1984. Perturbed free shear layers. Annu. Rev. Fluid Mech. 16 365-424.
- [8] Lemanov V.V, Terekhov V.I, Sharov K.A and Shumeiko A.A. 2013 An experimental study of submerged jets at low Reynolds numbers Tech. Phys. Lett. 39 421–423.
- [9] Lemanov V.V, Lukashov V.V, Abdrakhmanov R, Arbutov V.A, Dubnischchev Yu.N and Sharov K.A. 2018 Regimes of Unsteady Exhaustion and Diffusion Combustion of a Hydrocarbon Fuel Jet. Combustion Explosion and Shock Waves 54 255-263.

Об авторах

Арбузов Виталий Анисифорович, д.т.н., в.н.с. Института теплофизики СО РАН, arbutov@itp.nsc.ru.

Дубнищев Юрий Николаевич, д.т.н., профессор, г.н.с. Института теплофизики СО РАН, dubnischchev@itp.nsc.ru.

Леманов Вадим Владимирович, к.т.н., с.н.с. Института теплофизики СО РАН, lemanov@itp.nsc.ru.

Лукашов Владимир Владимирович, к.т.н., в.н.с., зав. лаб. термодинамической аэродинамики ИТ СО РАН, luka@itp.nsc.ru.