

УДК 535.3 : 536.42

ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОЛЬЦЕВЫХ ВИХРЕЙ С ПЛАМЕНЕМ*

В. А. Арбузов^{1,2}, Э. В. Арбузов^{2,3}, Н. А. Дворников¹,
Ю. Н. Дубнищев^{1,2}, В. Г. Нечаев², Е. О. Шлапакова²

¹Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1

²Новосибирский государственный технический университет,
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

³Институт математики им. С. Л. Соболева СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Колтуза, 4

E-mail: dubnistchev@itp.nsc.ru

Методами гильберт-оптики, сдвиговой интерферометрии и численного моделирования исследовано взаимодействие холодного вихревого кольца с пламенем в осесимметричной конфигурации. Численно моделировалось воздействие на пламя холодного вихревого кольца, образованного импульсом давления из кольцевой области, окружающей источник. Выявлены режимы дробления структуры пламени, отрыва и тушения при различных условиях формирования вихревого кольца. Показано, что и при полном, и при частичном тушении основная часть пламени отрывается вверх. Однако в случае неполного тушения пламени в его нижней части остаётся маленькая зона горения, которая затем восстанавливается до прежней.

Ключевые слова: вихревое кольцо, факел, гильберт-визуализация вихревых структур.

DOI: 10.15372/AUT20160208

Введение. Вихревые кольца являются объектом интенсивных научных исследований уже свыше ста лет. Их библиография обширна и хорошо представлена в [1]. Одно из применений вихревых колец — тушение пожара на скважинах [2] — инициировало интерес к проблеме взаимодействия вихревых колец с пламенем. В работах [3–6] экспериментально и численно исследовано образование и распространение кольцевого вихря пламени при подаче топливной смеси через круглое отверстие, режимы горения в кольцевом вихре. Отрыв пламени при взаимодействии с холодным тороидальным вихрем в них не рассматривался.

Цель данной работы — изучение взаимодействия пламени с холодным вихревым кольцом. Мотивацией является научная и практическая значимость этой проблемы. Исследования такого рода требуют комплексного подхода, сочетающего численное моделирование с экспериментом. Сложность эксперимента состоит в необходимости высокочувствительной визуализации полей фазовой оптической плотности воздушной среды, возмущённой вихревыми структурами и температурным полем. Для этого требуется применение методов, основанных на адекватных задаче оптических информационных технологиях. В качестве таких технологий в данной работе используются методы гильберт-оптики и сдвиговой интерферометрии в сочетании с численным моделированием. Моделируется развитие процесса горения в пламени при воздействии на него холодного кольцевого вихря.

*Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-08-00818) и Министерства образования и науки РФ (проект № 2012-218-03-004).

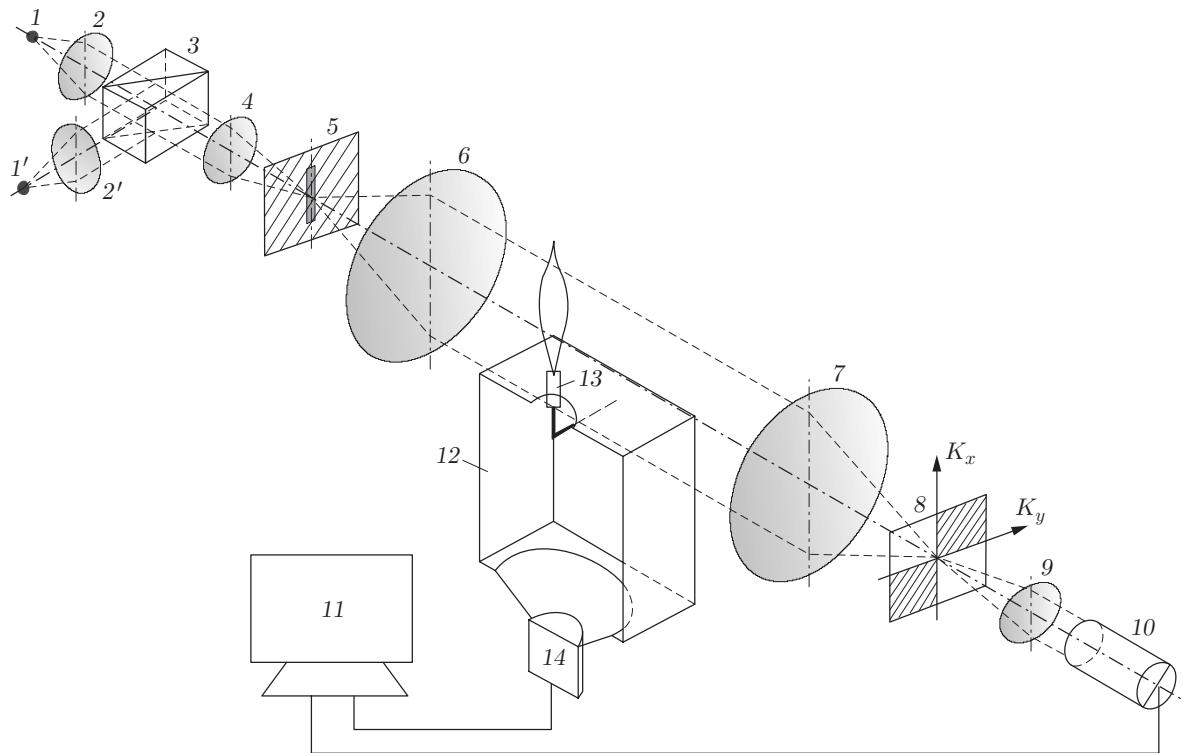


Рис. 1

Описание эксперимента. На рис. 1 показана упрощённая схема исследовательского комплекса [6–8], включающего в себя экспериментальный стенд и оптическую систему диагностики. Схема содержит осветительный модуль, состоящий из источников света 1 и 1', линз 2, 2' и 4, светоделительного кубика 3 и щелевой диафрагмы 5. Диафрагма расположена в передней фокальной плоскости объектива 6, формирующего зондирующее поле в исследуемой среде. Фурье-спектр фазовых возмущений, индуцируемых в этой среде факелом и вихревыми кольцами, подвергается гильберт-преобразованию квадрантным фильтром 8 в частотной плоскости объектива 7. Объектив 9 выполняет обратное фурье-преобразование фильтрованного светового поля, визуализируя его фазовые возмущения, которые регистрируются цифровой камерой 10, подключённой к компьютеру 11. Данный оптический комплекс реализован на базе теневого прибора ИАБ-463М с модифицированным осветительным модулем, узлами фильтрации оптического сигнала и регистрации изображения. Для интерферометрических исследований используется модифицированный интерферометр сдвига, выполненный в виде приставки к приёмному модулю прибора.

Экспериментальный стенд состоит из генератора вихревых колец 12 с выходным отверстием диаметром 24 мм. На тонком стержне, ориентированном по оси отверстия, помещена компактная горелка 13 цилиндрической формы, которая в экспериментах может замещаться свечой соответствующего диаметра. Генератор вихрей 12 по аналогии с описанным в [6, 7] представляет собой камеру с размерами полости $0,19 \times 0,19 \times 0,38$ м. Ось горелки проходит через центр отверстия верхней стенки камеры. Противоположная отверстию стенка камеры образована диффузором электродинамического генератора вихрей 14. На электродинамик подаются электрические импульсы, амплитудой, формой и скважностью которых управляет компьютер 11. Импульс давления на выходном отверстии генератора вихревых колец проверяется датчиком давления.

Когерентная передаточная функция квадратурного фазового фильтра, помещённого в

Фурье-плоскость, описывается выражением

$$H(K_x, K_y) = [e^{i\varphi}\sigma(K_x) + e^{-i\varphi}\sigma(-K_x)]\sigma(K_y) + [e^{-i\varphi}\sigma(K_x) + e^{i\varphi}\sigma(-K_x)]\sigma(-K_y), \quad (1)$$

где $\sigma(K_x)$ и $\sigma(K_y)$ — функции Хевисайда; K_x и K_y — пространственные частоты. С учётом $\sigma(\pm K_{x,y}) = (1 \pm \text{sgn}K_{x,y})$ ($\text{sgn}K_{x,y}$ — знаковая функция) формула (1) принимает вид

$$H(K_x, K_y) = \cos \varphi + \sin \varphi \cdot \text{sgn}K_x \cdot \text{sgn}K_y. \quad (2)$$

При такой фильтрации выполняется преобразование Фуко — Гильберта. На длине волны λ_0 , удовлетворяющей условию $\varphi(\lambda_0) = \pi/2$, оно трансформируется в преобразование Гильберта

$$H(K_x, K_y) = i \text{sgn}K_x \cdot \text{sgn}K_y. \quad (3)$$

Для щелевого источника, изображение которого ориентировано в частотной плоскости по оси K_x , на длине волны λ_0 реализуется одномерное преобразование Гильберта, а на длинах волн $\lambda \neq \lambda_0$ — одномерное преобразование Фуко — Гильберта. При этом в зависимости от ширины полосы излучения источника фильтрованное изображение приобретает соответствующую окраску. В случае узкополосного источника с точностью до первого порядка малости можно представить $\varphi(\lambda)$ как $\varphi(\lambda) = \varphi_{\lambda_0} + \Delta\varphi'_{\lambda}(\lambda_0)$, где $\varphi'_{\lambda} = d\varphi/d\lambda$. Тогда выражение для когерентной передаточной функции фильтра (2) будет иметь вид

$$H(\lambda) = -\Delta\varphi'_{\lambda}(\lambda_0) + i \text{sgn}K_x \cdot \text{sgn}K_y. \quad (4)$$

Визуализация фазовых возмущений зондирующего оптического поля, индуцируемых исследуемой средой, выполняется за счёт одномерного преобразования Фуко — Гильберта по оси K_y в спектральной полосе светового источника.

При гильберт-визуализации в качестве источника использовалась галогенная лампа. Для получения сдвиговых интерферограмм применялся полупроводниковый лазер с длиной волны 0,65 мкм. На рис. 2 показана последовательность видеокadres, иллюстрирующая процесс разрыва факела вихревым кольцом. Временной интервал между кадрами, соответствующий изменению номера кадра на единицу, составляет 20 мс.

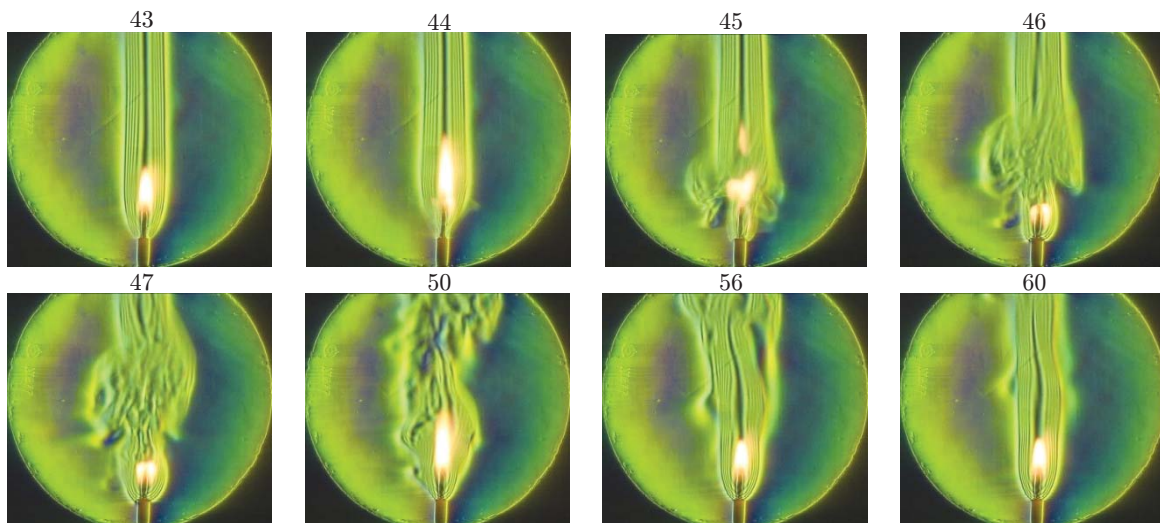


Рис. 2

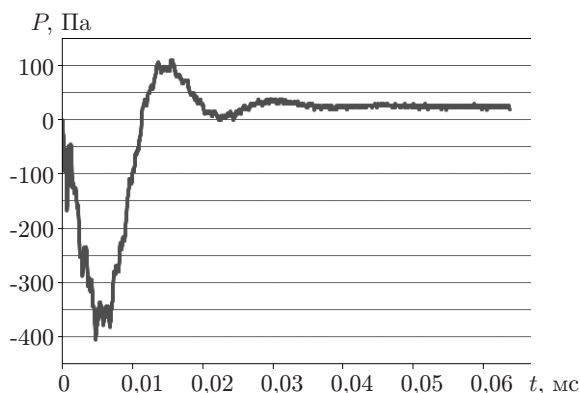


Рис. 3

Вихревое кольцо индуцировалось импульсом давления (рис. 3). Форма импульса при отрицательных значениях описывает избыточное давление относительно внешней среды на выходном отверстии генератора вихревых колец.

На рис. 4 показана последовательность сдвиговых интерферограмм взаимодействия вихревого кольца с пламенем свечи в том же режиме, что и на рис. 2. Временной интервал между кадрами равен 40 мс. Хорошо видна интерференционная структура пламени и его фрагмента, оторванного и снесённого вихревым кольцом.

Последовательность видеок кадров на рис. 5 отображает режимы отрыва пламени и гашения при взаимодействии с вихревым кольцом. Кольцо индуцировалось импульсом давления, огибающая которого аналогична огибающей, показанной на рис. 3, а амплитуда увеличена на 20 %. Визуализация осуществлялась методом гильберт-оптики.

На рис. 6 представлены соответствующие сдвиговые интерферограммы фазовых структур, отражающие воздействие вихревого кольца на пламя при тех же режимах, что и на рис. 5.

Гильберт-изображения, как и сдвиговые интерферограммы, несут информацию о динамике полей фазовой оптической плотности среды при взаимодействии вихревого кольца с пламенем и нужны для развития физических моделей этого процесса, полезных в практических приложениях.

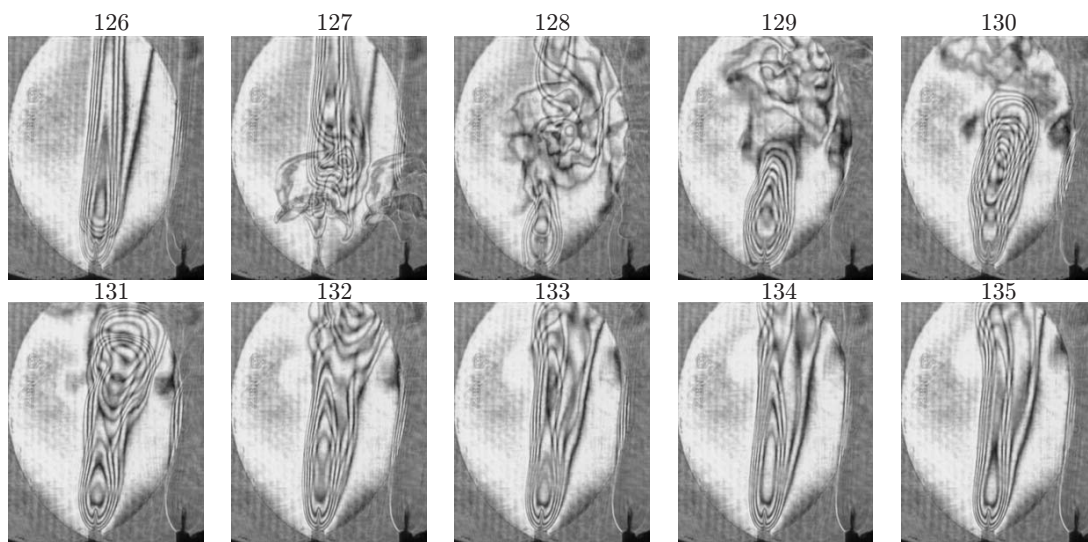


Рис. 4

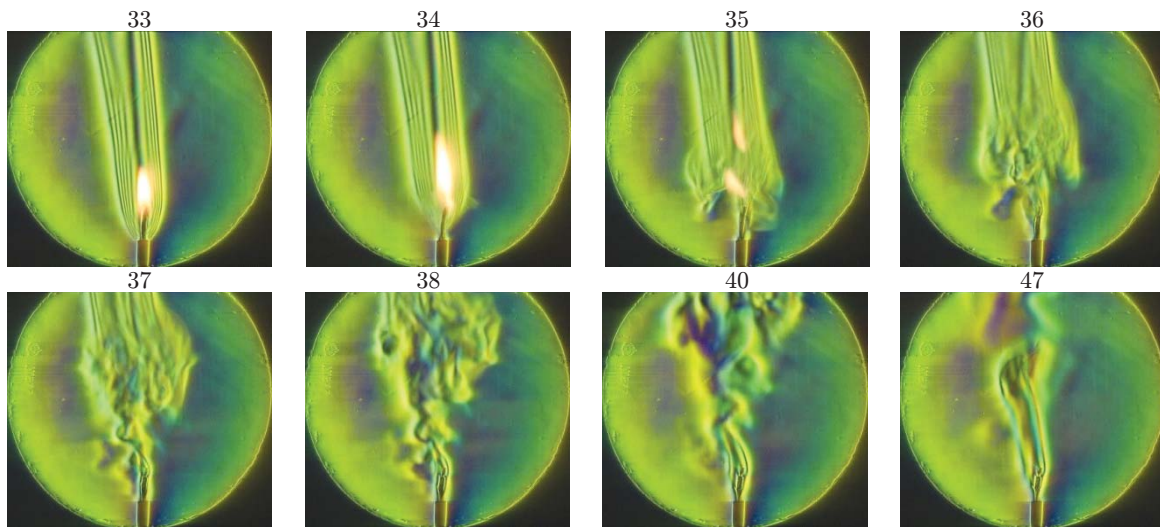


Рис. 5

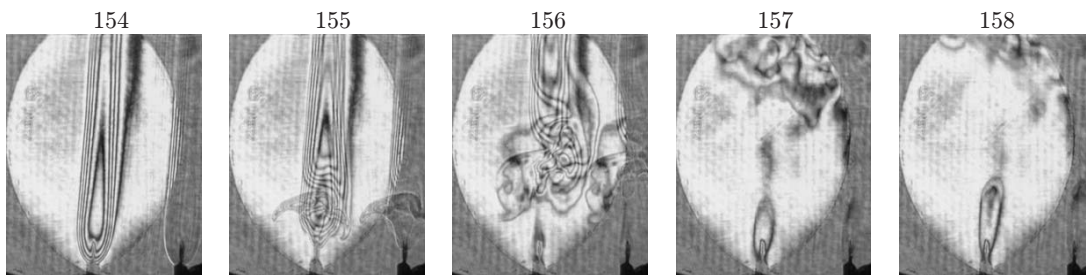


Рис. 6

Численное моделирование. В данной работе экспериментально и численно моделировалось воздействие на факел вихревого кольца, образованного импульсом давления из кольцевой области, окружающей пламя в нижней части горелки. В качестве горелки в расчётах использовалась затопленная в воздух вертикальная струя пропана, вытекающая из отверстия. Кольцевой вихрь генерировался при выходе сжатого воздуха из канавки на нижней стенке вокруг пламени.

Численно решена задача частичного срыва и погасания осесимметричного пламени пропана в воздухе (пламя направлено вверх). Уравнение для этого случая имеет вид

$$\frac{\partial \rho \Phi}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u \Phi)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial (\rho v r \Phi)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial y} \left(r \Gamma_{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) + S_{\Phi}, \quad (5)$$

где Φ — любая переменная, определяемая в процессе расчёта; u — компонента скорости; k — кинетическая энергия турбулентности; ε — скорость её диссипации; h — энтальпия смеси. В качестве модели турбулентности использовалась $k\varepsilon$ -модель с учётом эффектов ламинаризации и выбора соответствующих параметрических функций Γ_{Φ} и S_{Φ} [9]. Для решения применялась неявная первого порядка точности схема аппроксимации по времени и второго порядка точности схема QUICK по пространственным координатам.

Численное моделирование выполнялось для струи пропана, которая вдвигается через отверстие в стенке диаметром 6 мм в неподвижный атмосферный воздух с температурой 300 К. Соосно с отверстием в стенке сформирована кольцевая полость, внутренний радиус которой 20 мм, внешний — 25 мм, высота 10 мм. Полость заполнена воздухом под давлением. При её разгерметизации образуется вихревое кольцо, которое воздействует на пламя горящего пропана.

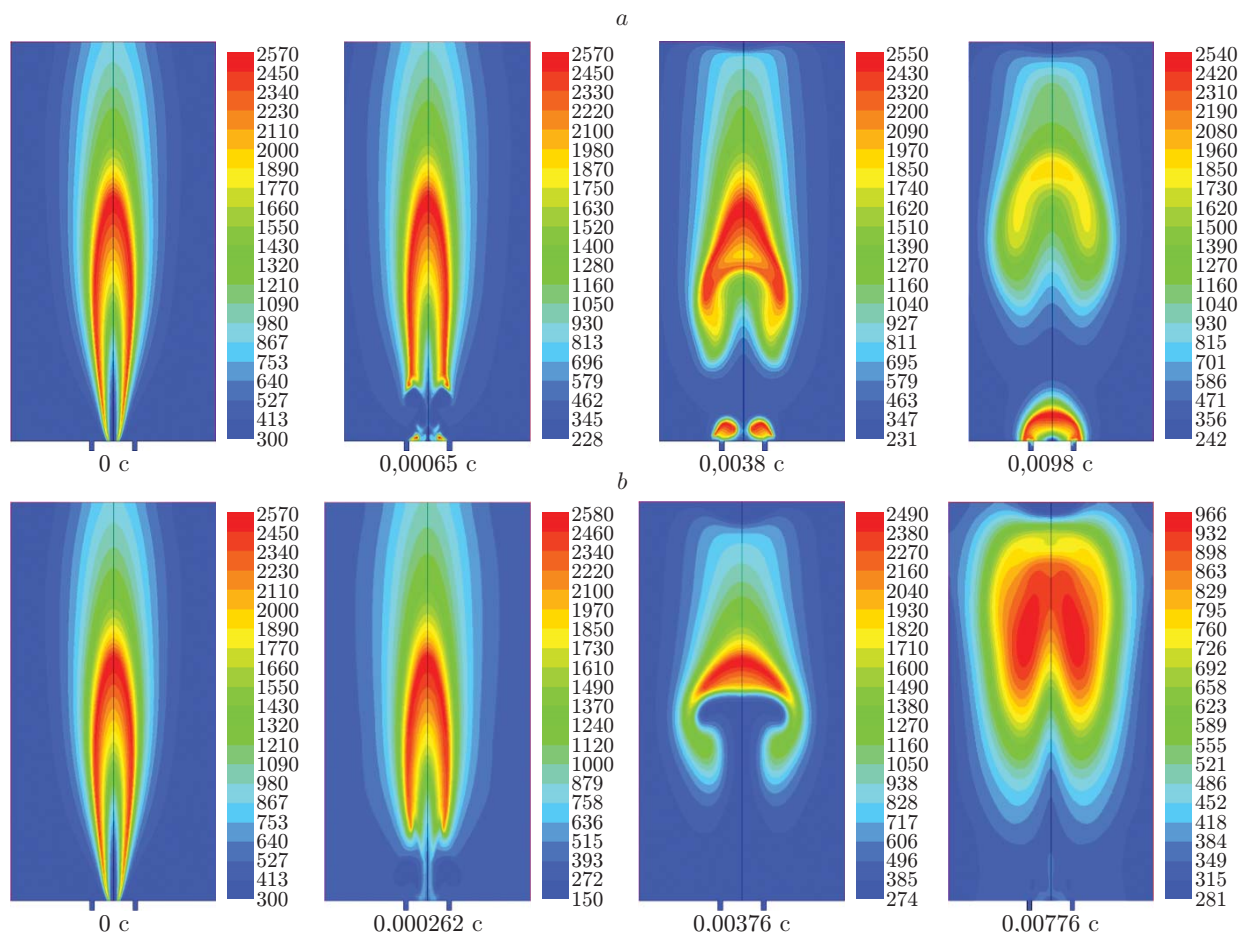


Рис. 7

На рис. 7 показаны результаты численного моделирования взаимодействия пламени с кольцевым вихрем, сформированным при разгерметизации полости канавки импульсом давления: *a* — 2 атмосферы, *b* — 10 атмосфер. Под рисунками указано время с момента разгерметизации. Видно, что при импульсе в 2 атмосферы, как и при импульсе в 10 атмосфер, пламя отрывается импульсом от нижней части факела. Однако при импульсе в 2 атмосферы остаётся зародыш пламени в нижней части факела, который разгорается до больших размеров. При импульсе в 10 атмосфер пламя полностью срывается и факел гаснет.

Все расчёты производились по осесимметричной модели с одностадийной реакцией сгорания пропана с использованием стандартной $k\varepsilon$ -модели турбулентности. Они выполнены с помощью пакета Флюент, установленного в Сибирском суперкомпьютерном центре СО РАН. Результаты моделирования иллюстрируют качественное согласие с экспериментом.

Заключение. Методами гильберт-оптики и сдвиговой интерферометрии впервые визуализировано взаимодействие вихревого кольца и факела в режимах разрыва структуры пламени, отрыва и погасания. Экспериментально (см. рис. 2, 4) и численно (см. рис. 7, *a*) исследованы и сопоставлены режимы частичного отрыва пламени без погасания, а также режимы эволюции зоны горения при полном погасании пламени за счёт воздействия холодного тороидального вихря (см. рис. 5, 6 и 7, *b*). Иллюстрируются качественное согласие результатов численного моделирования и эксперимента, а также адекватность используемых технологий оптической диагностики поставленной задаче.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ахметов Д. Г.** Вихревые кольца. Новосибирск: ГЕО, 2007. 151 с.
2. **Ахметов Д. Г., Луговцов Б. А., Тарасов В. Ф.** Тушение пожаров на газонефтяных скважинах с помощью вихревых колец // Физика горения и взрыва. 2000. **180**, № 5. С. 8–14.
3. **Дубнищев Ю. Н., Дворников Н. А., Нечаев В. Г., Новоселова О. Н.** Полихроматическая гильберт-диагностика эволюции вихревых колец, индуцированных скачком давления на отверстии // Автометрия. 2012. **48**, № 3. С. 13–21.
4. **Renard P.-H., Thevenin D., Rolon J. C., Candel S.** Dynamics of flame/vortex interactions // Progress in Energy and Combust. Sci. 2000. **26**, N 3. P. 225–282.
5. **Ishizuka S.** Flame propagation along a vortex axis // Progress in Energy and Combust. Sci. 2002. **28**, N 6. P. 477–542.
6. **Safta C., Madnia C. K.** Characteristics of methane diffusion flame in a reacting vortex ring // Combust. Theory Modelling. 2004. **8**. P. 449–474.
7. **Арбузов В. А., Дубнищев Ю. Н., Нечаев В. Г. и др.** Гильберт-диагностика фазовых возмущений светового поля, индуцированных вихревым течением // Автометрия. 2013. **49**, № 6. С. 107–114.
8. **Арбузов В. А., Арбузов Э. В., Бердников В. С. и др.** Оптическая диагностика структуры и эволюции плавучих струй в сильновязкой жидкости // Автометрия. 2014. **50**, № 5. С. 47–55.
9. **Ши Д.** Численные методы в задачах теплообмена. М.: Мир, 1988. 544 с.

Поступила в редакцию 26 мая 2015 г.
