



УДК 555.3: 536.42

В.А. Арбузов^{1,2}, Э.В. Арбузов³, Н.И. Дворников¹, Ю.Н. Дубнищев^{1,2}, В.Г. Нечаев²,
Е.О. Шлапакова²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1.

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
«Новосибирский государственный технический университет»,
630092, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20.

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт математики им. С.Л. Соболева
Сибирского отделения Российской академии наук,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 4.
E-mail: dubnistchev@itp.nsc.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОЛЬЦЕВЫХ ВИХРЕЙ С ФАКЕЛОМ

АННОТАЦИЯ

Методами гильберт-оптики, сдвиговой интерферометрии и численного моделирования исследовано взаимодействие вихревого кольца с факелом в осесимметричной конфигурации. Выявлены режимы дробления структуры факела, отрыва и тушения пламени при различных режимах формирования вихревого кольца

ВИХРЕВОЕ КОЛЬЦО, ФАКЕЛ, ГИЛЬБЕРТ–ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР

ВВЕДЕНИЕ

Вихревые кольца являются объектом интенсивного научного исследования уже свыше ста лет. Библиография этих исследований обширна [1]. Одно из применений вихревых колец – тушение пожара на скважинах [2]. Это инициировало интерес к проблеме взаимодействия вихревых колец с пламенем. 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 потребовалось 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. Мотивацией комплексного исследования взаимодействия вихревого кольца и пламени явилась практическая значимость проблемы.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 1 показана упрощённая схема экспериментальной установки, состоящая из экспериментального стенда и оптической системы диагностики. Схема содержит осветительный модуль, состоящий из источника света 1 и 1', линз 2 и 2', светоделительного кубика 3, линзы 4 и щелевой диафрагмы 5. Щелевая диафрагма расположена в передней фокальной плоскости объектива 6, формирующего зондирующее поле в исследуемой среде. Фурье-спектр фазовых возмущений, индуцируемых в исследуемой среде факелом и вихревыми кольцами, формируется объективом 7 в частотной плоскости, где помещён квадрантный гильберт-фильтр 8. Объектив 9 выполняет обратное Фурье-преобразование фильтрованного светового поля, визуализируя его фазовые возмущения, которые регистрируются цифровой камерой 10, подключенной к компьютеру 11. Этот 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 некоторых экспериментах может замещаться свечой соответствующего диаметра. Генератор вихрей 12 идентичен описанному в [3]. Он представляет собой камеру, полость которой имеет размеры $0,19 \times 0,19 \times 0,38$ м. В верхней стенке камеры имеется отверстие, через центр которого проходит ось горелки. Противоположная отверстию стенка камеры образована диффузором электродинамического генератора вихрей 14. На электродинамик подаются электрические импульсы, амплитуда, форма и скважность которых контролируется компьютером 11. Импульс давления на выходном отверстии генератора вихревых колец контролируется датчиком давления.

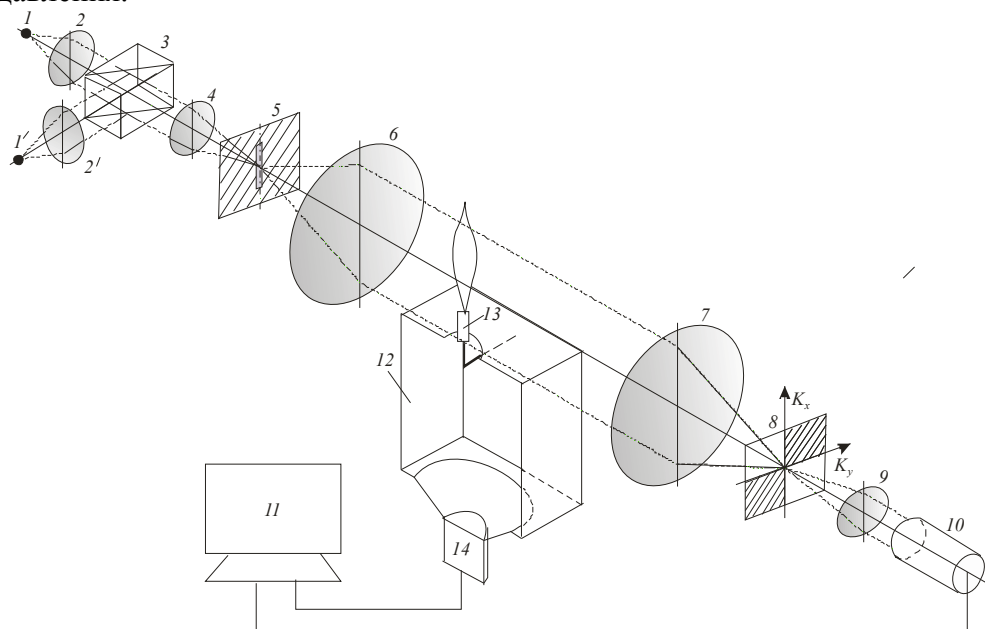


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

На рис. 2 показана последовательность видеок кадров, иллюстрирующая процесс разрыва факела вихревым кольцом.

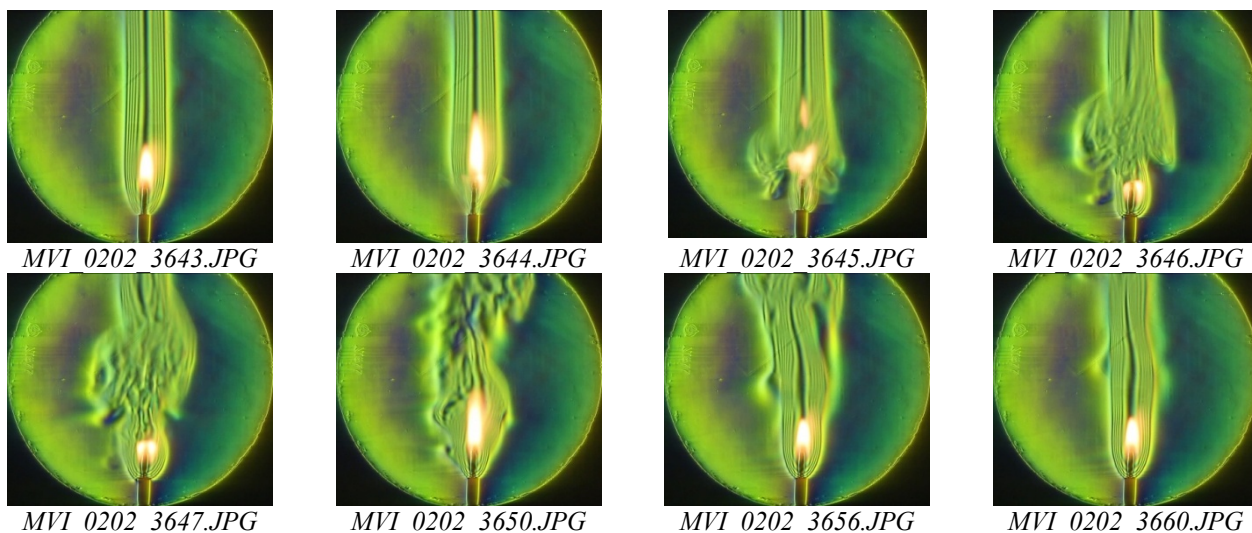


Рис. 2. Гильберт-визуализация взаимодействия вихревого кольца с факелом

Вихревое кольцо индуцировалось импульсом давления, показанным на рис. 3 (форма импульса ниже оси описывает избыточное давление относительно внешней среды на выходном отверстии генератора вихревых колец).

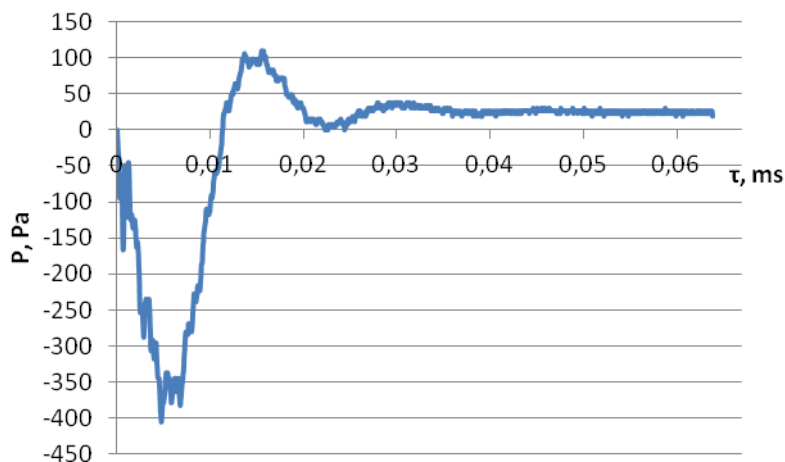


Рис. 3. Импульс давления, индуцирующий вихревое кольцо

Временной интервал между кадрами, соответствующий изменению номера кадра на единицу, составляет 20 мс.





Рис. 4. Сдвиговые интерферограммы, иллюстрирующие взаимодействие вихревого кольца с факелом в том же режиме, что и на рис. 2

На рис. 4 показана последовательность сдвиговых интерферограмм, иллюстрирующих взаимодействие 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 иллюстрирует режим отрыва пламени и гашения при взаимодействии с вихревым кольцом. Вихревое кольцо индуцировалось импульсом давления, огибающая которого аналогична огибающей, показанной на рис. 3, а амплитуда увеличена на 20 %.

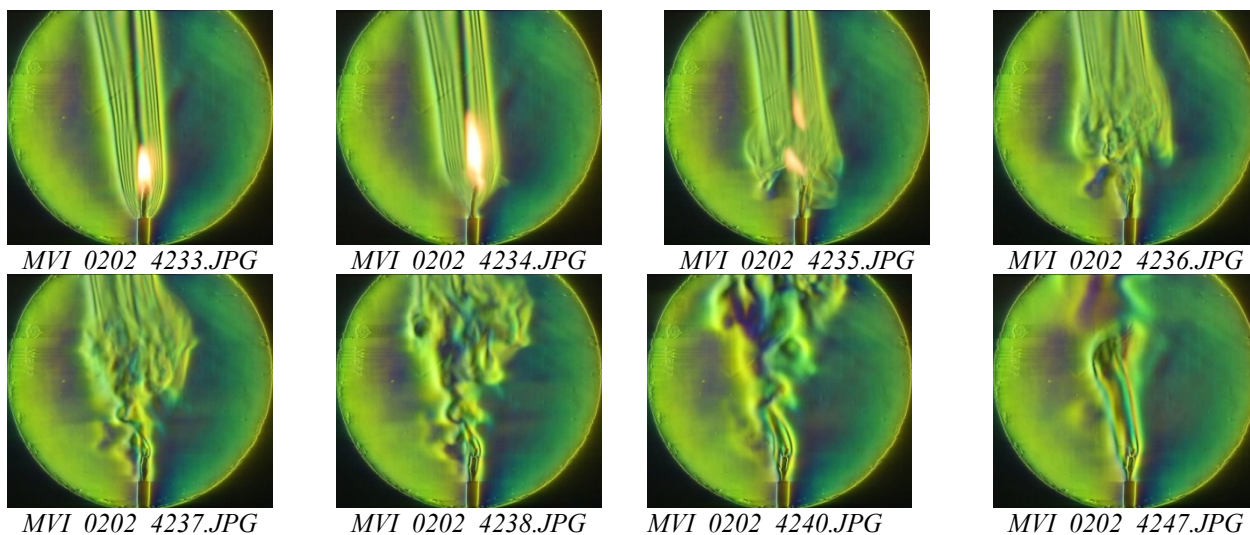


Рис. 5. Гильберт-визуализация тушения факела вихревым кольцом

Рис. 6 иллюстрирует соответствующие сдвиговые интерферограммы фазовых структур, отражающие взаимодействие вихревого кольца и факела при тех же режимах, что и на рис. 5.

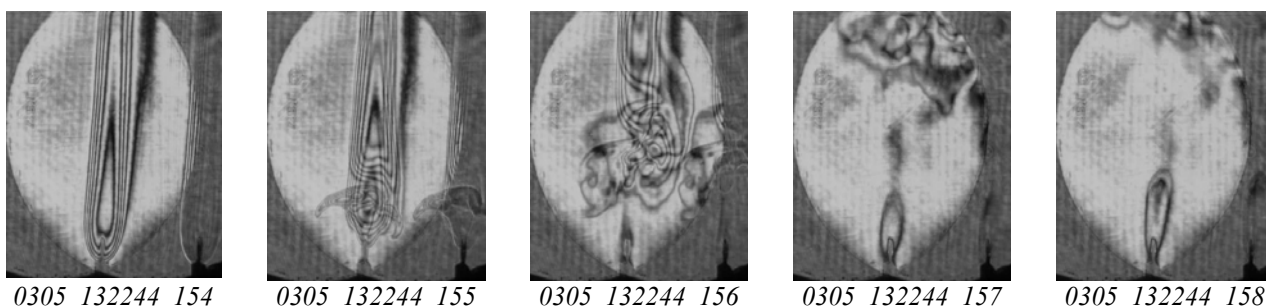


Рис. 6. Сдвиговые интерферограммы, иллюстрирующие тушение вихревым кольцом

Гильберт-изображение, как и сдвиговая интерферограмма, несёт информацию о динамике полей фазовой оптической плотности среды при взаимодействии вихревого кольца

с пламенем. Эти результаты полезны для развития физических моделей такого взаимодействия и практических приложений.

Численное моделирование выполнялось для струи пропана, которая при температуре 300К вдувается в неподвижный атмосферный воздух с температурой 300 К. Струя вдувается через отверстие в стенке диаметром 6 мм. На расстоянии 20 мм от центра имеется канавка высотой 10 мм с внутренним радиусом 20 мм и внешним 25 мм. Канавка заполнена воздухом под давлением. При разгерметизации канавки образуется кольцевой вихрь, который воздействует на пламя горящего пропана.

Рис. 7 иллюстрирует процесс отрыва фрагмента пламени при сохраняющемся режиме горения (температурное поле). Амплитуда импульса давления в канавке 2 атм., скорость струи – 2 м/с.

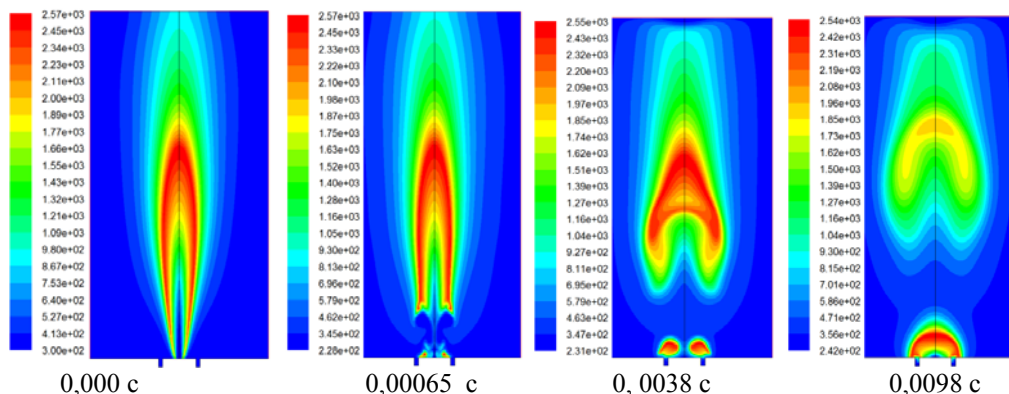


Рис. 7. Моделирование взаимодействия вихревого кольца с факелом. Амплитуда импульса давления в кольцевой канавке 2 атм

На рис. 8 показан процесс отрыва и гашения пламени при взаимодействии с вихревым кольцом. Амплитуда импульса давления в кольцевой канавке соответствует 10 атм.

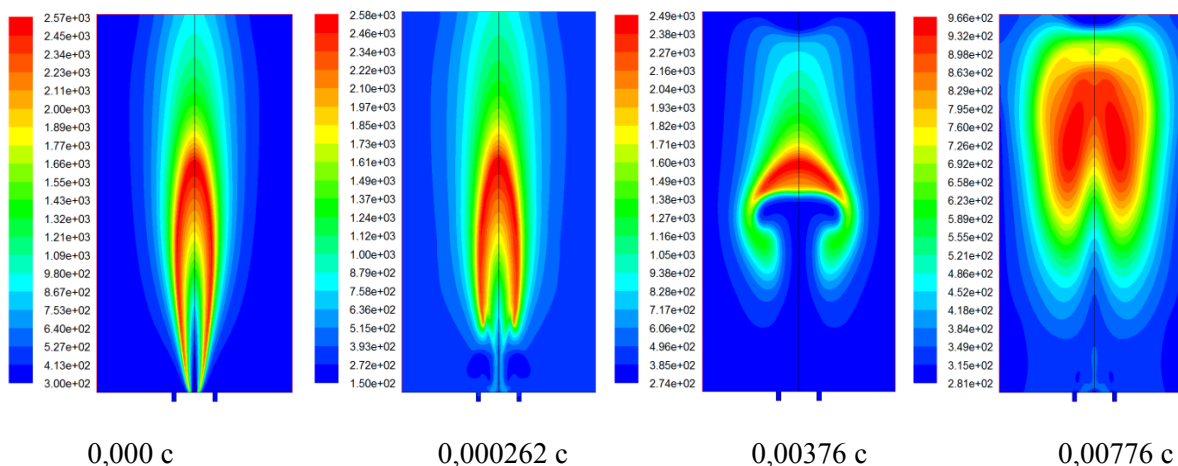


Рис. 8. Моделирование взаимодействия вихревого кольца с факелом. Амплитуда импульса давления в кольцевой канавке 10 атм

Видно, что при давлении в две атмосферы, как и при импульсе в 10 атмосфер пламя отрывается вихревым кольцом от низа факела. Однако при двух атмосферах остается маленький зародыш пламени в нижней части факела, который разгорается до больших размеров. При импульсе в десять атмосфер пламя полностью срывается от низа факела и факел гаснет.

Расчеты производились по осесимметричной модели с одностадийной реакцией сгорания пропана с использованием стандартной $k-\epsilon$ модели турбулентности. Они

выполнены пакетом Флюент, установленным 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 гашения. Иллюстрируется качественное согласие результатов численного моделирования и эксперимента.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 14–08–00818).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ахметов Д.Г.** Вихревые кольца. Новосибирск: изд-во 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. 180. № 5. С. 8–14.
3. **Дубнищев Ю.Н., Дворников Н.А., Нечаев В.Г., Новосёлова О.Н.** Полихроматическая гильберт-диагностика эволюции вихревых колец, индуцированных скачком давления на отверстиях // Автометрия. 2012. Т. 48, № 3, С. 13–21.

V.A. Arbutov^{1,2}, E.V. Aprbuzov³, N.A. Dvornikov¹, Yu.N. Dubnishchev^{1,2}, V.G. Nechaev²,
E.O. Shlapakova²

¹ *Kutateladze Institute of Thermophysics,
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
pr. Akademika Lavrent'eva, 1, Novosibirsk, 630090 Russia*

² *«Novosibirsk State Technical University»,
pr. K. Marksa, 20, Novosibirsk, 630092 Russia*

³ *Sobolev Institute of Mathematics,
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
pr. Akademika Koptyuga, 4, Novosibirsk, 630090 Russia
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 4.*

E-mail: dubnistchev@itp.nsc.ru

INTERACTION OF VORTEX RING WITH A TORCH

Interaction of the vortex ring with torch in the axisymmetric configuration investigated by methods of Hilbert–optics, shearing interferometry and numerical simulation. The modes crushing structure torch, separation and extinguish flames are identified at various regimes of formation of the vortex rings.

VORTEX RINGS, TORCH, HILBERT VISUALIZATION OF VORTEX STRUCTURES