

*Двенадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 25 — 28 июня 2013 г.*

УДК 353.8, 532.52, 534.2, 853.09

В.А. Арбузов^{1,2}, Ю.Н. Дубнищев^{1,2}, Н.А. Дворников¹, В.Г. Нечаев², О.Н. Новосёлова²,
Д.С. Печкин²

¹ *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1.
E-mail: dubnistchev@itp.nsc.ru*

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

**ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА КОМПЛЕМЕНТАРНЫХ ВИХРЕВЫХ КОЛЕЦ,
ИНДУЦИРОВАННЫХ ИМПУЛЬСОМ ДАВЛЕНИЯ НА ОТВЕРСТИИ**

АННОТАЦИЯ

Обсуждаются методы гильберт–фильтрации фазовых возмущений светового поля в спектральной полосе излучения источника. Экспериментально исследована эволюция комплементарных вихревых колец, индуцированных в воздушной среде импульсом давления на отверстия в стенке камеры. Выполнено численное моделирование структуры вихревых колец.

**ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ПОТОКОВ; ГИЛЬБЕРТ–ОПТИКА;
КРУПНОМАСШТАБНЫЕ ВИХРЕВЫЕ СТРУКТУРЫ; ВИХРЕВЫЕ КОЛЬЦА.**

ВВЕДЕНИЕ

Оптическая диагностика потоков давно и успешно применяется в экспериментальной гидро– и газодинамике. Она отличается многообразием методов и средств, которые составляют современный арсенал исследователя. Большой потенциал развития и применения имеет гильберт–диагностика потоков (HFV – Hilbert Flow Visualization) [1–3], позволяющая визуализировать пространственно–временные фазовые возмущения светового поля исследуемой средой. В качестве примеров плодотворного применения методов гильберт–оптики можно привести обнаружение таких явлений, как существование биспиральных вихревых структур в течении Ранка [4] или возникновение комплементарных вихревых колец, индуцированных скачком давления на отверстия [5, 6]. Хотя теоретическая и экспериментальная база гильберт–оптики хорошо разработана [8–10], потенциал её развития далеко не исчерпан. В частности, это касается анализа амплитудно–фазовых характеристик фильтров и динамического диапазона фазовых возмущений при гильберт–диагностике в спектральной полосе зондирующего поля, а также исследований тонкой структуры и эволюции вихревых течений, индуцированных импульсом давления при различных граничных и начальных условиях. Необходимость рассмотрения этих вопросов и мотивирована настоящая работа.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В методах гильберт–оптики, основанных на применении фильтров, имеющих квадрантную структуру, преобразование Гильберта не является изотропным. При изотропном преобразовании Гильберта используются фильтры с осевой или винтовой симметрией [2, 3, 7]. Для фильтра с квадрантной структурой когерентно–передаточная функция (КПФ) в общем случае имеет вид

$$\begin{aligned} H(K_x, K_y) &= [\tau_1 e^{i\varphi} \sigma(K_x) + \tau_2 e^{-i\varphi} \sigma(-K_x)] \sigma(K_y) + \\ &+ [\tau_2 e^{-i\varphi} \sigma(K_x) + \tau_1 e^{i\varphi} \sigma(-K_x)] \sigma(-K_y) = \\ &= \frac{1}{2} \{ (\tau_1 + \tau_2) \cos \varphi + i \tau_{12} \sin \varphi + [\tau_{12} \cos \varphi + i(\tau_1 + \tau_2) \sin \varphi] \operatorname{sgn} K_x \operatorname{sgn} K_y \} = \\ &= \frac{1}{2} \{ [\tau_1 + \tau_2 + \tau_{12} \operatorname{sgn} K_x \operatorname{sgn} K_y] \cos \varphi + i [\tau_{12} + (\tau_1 + \tau_2) \operatorname{sgn} K_x \operatorname{sgn} K_y] \sin \varphi \}, \quad (1) \end{aligned}$$

где φ – фазовый сдвиг; $\sigma(\pm K_x)$ и $\sigma(\mp K_y)$ – функции включения (Хевисайда): $\sigma(\pm K_x) = \frac{1}{2}(1 \pm \operatorname{sgn} K_x)$, $\sigma(\pm K_y) = \frac{1}{2}(1 \pm \operatorname{sgn} K_y)$, K_x и K_y – пространственные частоты в декартовой системе отсчёта, τ_1 и τ_2 – амплитудные коэффициенты пропускания: τ_1 – в квадранте $\operatorname{sgn} K_x \operatorname{sgn} K_y > 0$, τ_2 – в квадранте $\operatorname{sgn} K_x \operatorname{sgn} K_y < 0$.

При произвольном φ и $\tau_1 = \tau_2 = 1$ для КПФ имеем:

$$H(K_x, K_y) = \cos \varphi + i \sin \varphi [\operatorname{sgn} K_x \operatorname{sgn} K_y]. \quad (2)$$

Отсюда видно, что такой фильтр, имеющий фазовую структуру, выполняет двумерное преобразование Фуко–Гильберта.

Поскольку фазовый сдвиг φ зависит от длины волны, $\varphi = \varphi(\lambda)$, фазовый фильтр с когерентной передаточной функцией (2) выполняет полихроматическую фильтрацию Фуко–Гильберта в спектральной полосе источника, освещающего исследуемую среду:

$$H(K_x, K_y) = \cos[\varphi(\lambda)] + i \sin[\varphi(\lambda)] \operatorname{sgn} K_x \operatorname{sgn} K_y.$$

В случае $\varphi = \frac{\pi}{2}$ и $\tau_1 = \tau_2 = 1$ когерентно–передаточная функция (2) фильтра принимает вид

$$H(K_x, K_y) = i \operatorname{sgn} K_x \operatorname{sgn} K_y.$$

Структура такого фильтра чисто фазовая, и он реализует двумерную гильберт–фильтрацию $\operatorname{sgn} K_x \operatorname{sgn} K_y$ с точностью до множителя $i^{n/2}$ ($n = 0, 1, 2, \dots$).

Обратимся к гильберт–диагностике полей фазовой оптической плотности. Пусть фазовые возмущения светового поля, индуцированные исследуемой средой, гармонически изменяются по оси x и описываются выражением

$$s(x, y) = e^{i\eta \sin(K_{x_0} x)}, \quad (3)$$

где K_{x_0} , – пространственная частота и ξ – амплитуда фазовых возмущений, $\eta = \eta_0 + \xi$, $\eta_0 = kh$, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ – длина волны зондирующего поля, h определяется из уравнения

$$h \sin(K_{x_0} x) = q\lambda, \quad q = 0, 1, 2, 3 \dots, \quad (4)$$

следующего из условия

$$\eta_0 \sin(K_{x_0} x) = 2\pi q.$$

Представим функцию $s(x, y)$ рядом Фурье:

$$\begin{aligned} s(x, y) &= e^{i\xi \sin(K_{x_0} x)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\xi) e^{inK_{x_0} x} = \\ &= J_0(\xi) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(\xi) \cos(2nK_{x_0} x) + 2 \sum_{n=0}^{\infty} J_{2n+1}(\xi) \sin[(2n+1)K_{x_0} x]. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь $J_n(\xi)$ – функция Бесселя. Отсюда для гильберт–сопряжённого по оси x сигнала получаем:

$$\hat{s}_x(x, y) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(\xi) \sin(2nK_{x_0} x) - 2 \sum_{n=0}^{\infty} J_{2n+1}(\xi) \cos[(2n+1)K_{x_0} x] \approx -2J_1(\xi) \cos(K_{x_0} x). \quad (6)$$

Здесь мы пренебрегли членами с гармониками высшего порядка. Из сравнения выражений (6) и (3) видно, что при гильберт–диагностике фазовые возмущения с произвольной амплитудой визуализируются в плоскости регистрации гильберт–сопряжённого сигнала. В структуре гильберт–сопряжённого сигнала формируются так называемые гильберт–полосы (4), которые несут информацию о глубине фазового рельефа. Пространственный период гильберт–полос соответствует изменению глубины фазового рельефа на длину волны зондирующего светового поля, что даёт возможность по структуре гильберт–полос определять пространственный профиль фазовых возмущений в исследуемой среде. Расположение этих полос соответствует уравнению (4) и следует из свойств гильберт–преобразования как операции пространственного квазидифференцирования.

Примеры профилей фазовых возмущений, восстановленных по структуре гильберт–полос, приведены в [7, 8]. Гильберт–фильтрация позволяет визуализировать двумерную структуру полей фазовой оптической плотности в исследуемой среде при произвольной амплитуде фазовых возмущений.

Комплементарные вихревые кольца, индуцированные импульсом давления на отверстия, исследовались на экспериментальной установке, упрощённая схема которой показана на рис. 1. Схема содержит последовательно расположенные источник освещения 1, коллимационный объектив 2, фурье–объектив 3, в частотной плоскости которого помещён фильтр 4, и фурье–объектив 5. Фурье–объектив 5 выполняет обратное фурье–преобразование и восстанавливает фильтрованное изображение, которое регистрируется ССД камерой 6. Исследуемые вихревые течения формируются внутри и снаружи камеры 7. Камера имеет конструкцию, аналогичную [6], и снабжена боковыми окнами оптического качества для наблюдения вихревых структур во внутренней полости, размеры которой $0,19 \times 0,19 \times 0,38$ м. Задняя стенка камеры образована диффузором электродинамического громкоговорителя,

управляемого электрическими импульсами, поступающими через усилитель с выхода звуковой платы компьютера 8. В передней стенке камеры имеется отверстие, диаметр которого может меняться за счет встраиваемых диафрагм. Оптический измерительный комплекс [6] был создан на основе серийного теневого прибора ИАБ–463М со специально разработанным для целей эксперимента модулем оптической гильберт–фильтрации и источником освещения. Компьютерная система управления экспериментом обеспечивала контроль формы и скважности импульсов, поступающих на электродинамический генератор, измерение импульса давления в камере, а также синхронизацию работы электродинамического генератора и системы регистрации изображений вихревых структур. Давление регистрировалось калиброванным микрофонным датчиком в плоскости отверстия. В эксперименте использовался щелевой источник с ртутной лампой ДРШ–250, изображение которого в частотной плоскости задавало одну из осей пространственно-частотного координатного базиса, и квадрантный фазовый фильтр, реализующий преобразование Фуко–Гильберта в спектральной полосе источника освещения.

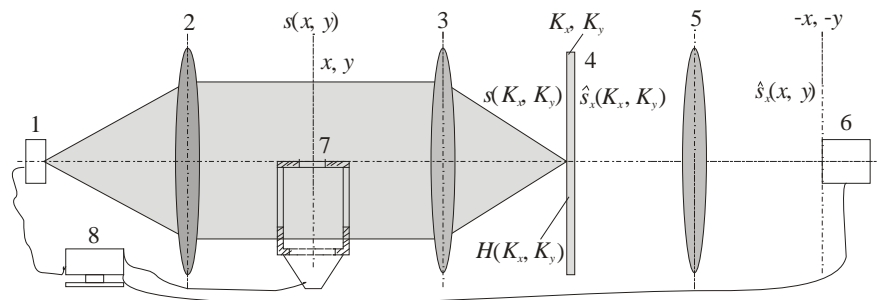
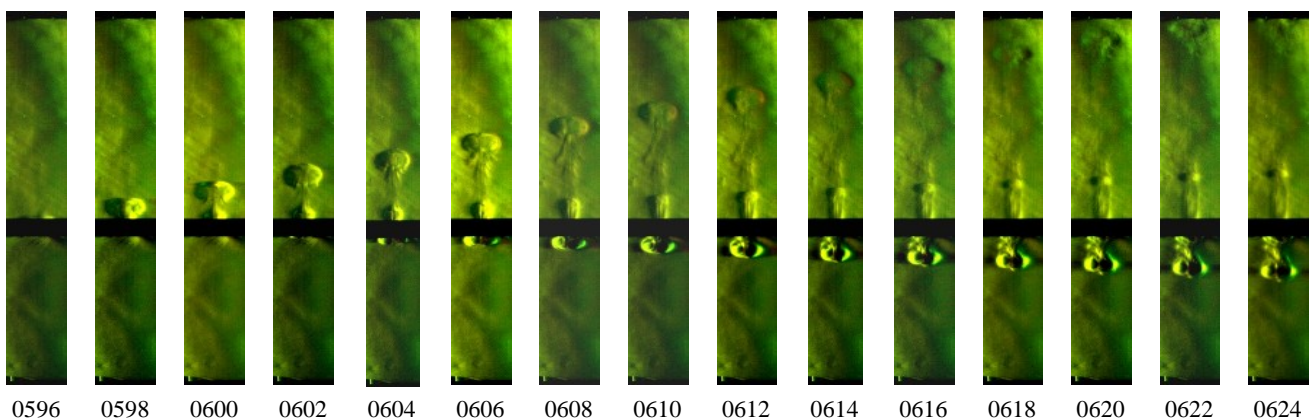


Рис. 1. Упрощённая схема экспериментально–измерительного комплекса и генератора вихревых колец: 1 – источник освещения; 2, 3 и 5 – фурие–объективы; 4 – квадратурный гильберт–фильтр в частотной плоскости K_x, K_y ; 6 – CCD камера; 7 – генератор вихревых колец; 8 – компьютерная система управления экспериментом.

На рисунках 2 и 3 показаны примеры визуализированных фазовых структур, иллюстрирующих эволюцию комплементарных вихревых колец, индуцированных, соответственно, положительным (рис.4) и отрицательным (рис.5) импульсами давления на отверстии диаметром 20 мм. Каждый кадр отображает прямоугольную область шириной 52 мм и высотой 464 мм.



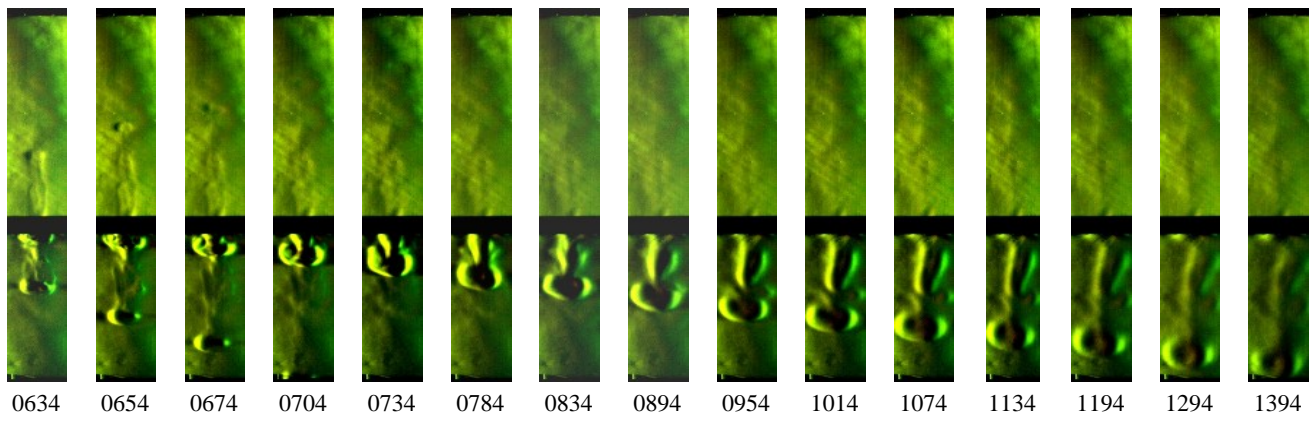


Рис. 2. Вихревые структуры, индуцированные положительным импульсом давления 1200 Па на отверстии $\varnothing 20$ мм.

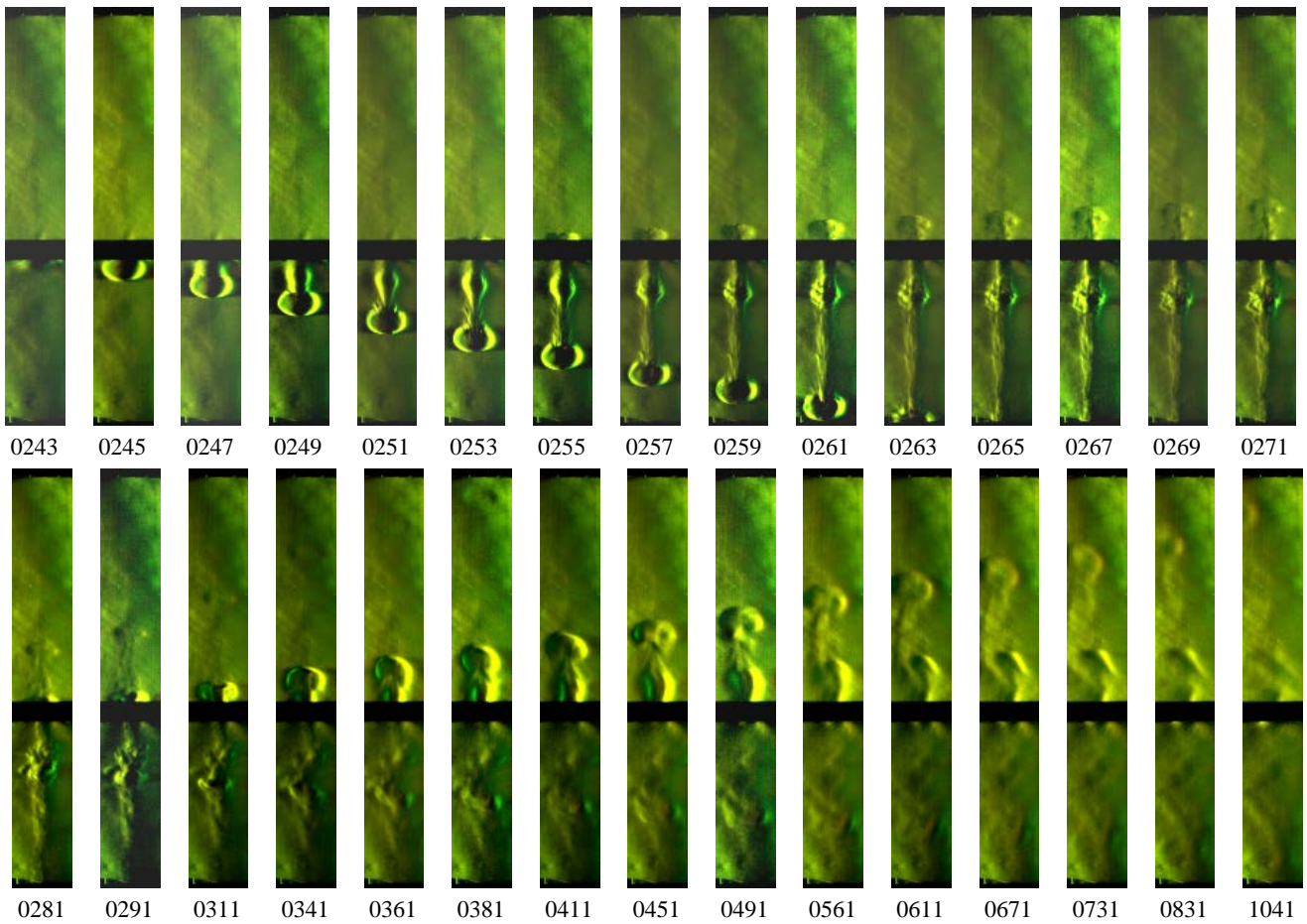


Рис. 3. Вихревые структуры, индуцированные отрицательным импульсом давления 1200 Па на круглом отверстии $\varnothing 20$ мм.

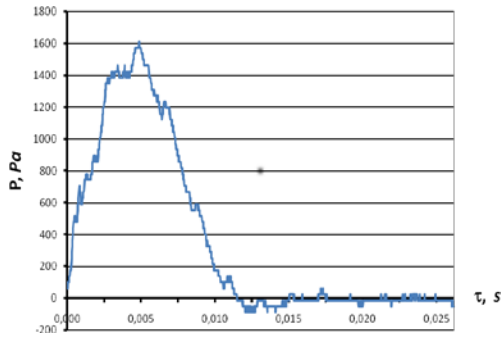


Рис. 4. Положительный импульс давления на отверстии.

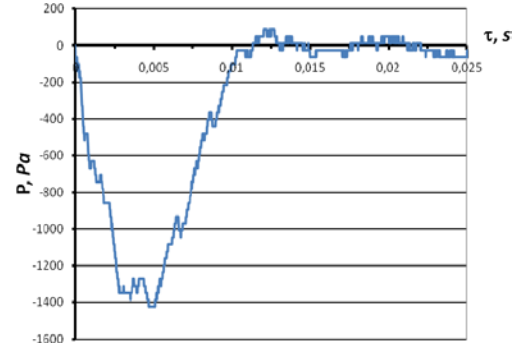
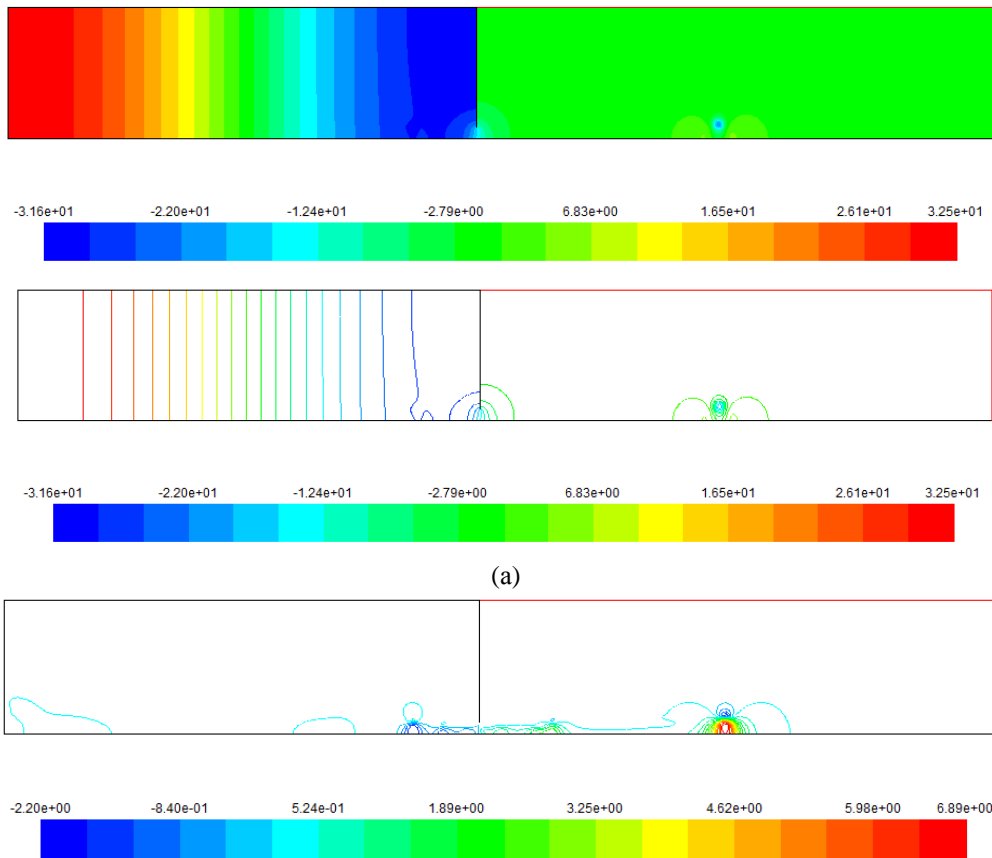
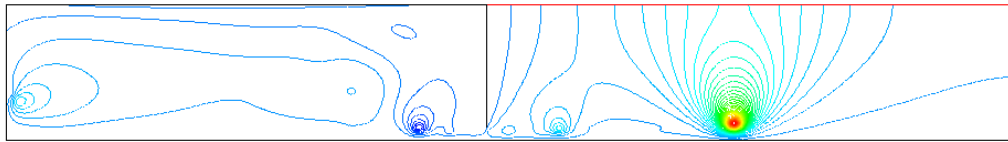


Рис. 5. Отрицательный импульс давления на отверстии.

В последовательности хронофотографий отличие номера кадра на единицу соответствует межкадровому интервалу 0,7 мс, время экспозиции одного кадра 0,1 мс. Вихревое кольцо внутри камеры при положительном импульсе давления возникало с запаздыванием относительно наружного кольца на временной интервал, приблизительно соответствующий длительности импульса давления. При отрицательном импульсе давления – с запаздыванием относительно внутреннего индуцировалось внешнее вихревое кольцо. Это указывает на струйный механизм генерации вихревых колец. Эволюция вихревых колец, индуцированных импульсом давления и распространяющихся снаружи и внутри камеры, зарегистрирована впервые.



(б)



(в)

Рис. 6. Поля давления (а), аксиальной скорости (б) и линий тока (в) в течении, индуцированном положительным импульсом на задней стенке камеры через 64 мс.

На рис. 6 показан пример структуры комплементарных вихревых колец, полученный в результате численного моделирования. Численное моделирование выполнялось на основе нестационарного уравнения Навье–Стокса для ламинарного баротропического осесимметричного течения. Структуры комплементарных вихревых колец, полученных экспериментально и численным моделированием, имеют качественное соответствие.

Обнаружение вихревых колец, индуцированных скачком давления внутри камеры с соплом является иллюстрацией плодотворного применения разработанных методов оптической гильберт–диагностики полей фазовой оптической плотности в задачах экспериментальной гидро– и газодинамики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована структура оптических фильтров в системах гильберт–диагностики полей фазовой оптической плотности в газовых и конденсированных средах. Гильберт фильтрация позволяет выявлять в световых полях фазовые возмущения произвольной амплитуды. Возможности методов оптической гильберт–диагностики иллюстрируются на примере впервые зарегистрированной эволюции комплементарных вихревых колец, индуцированных импульсом давления на отверстии и распространяющихся в противоположных направлениях внутри и вне камеры. Экспериментальные результаты качественно согласуются с численным моделированием.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 10–08–00813.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сороко Л.М. Гильберт–оптика. М.: Наука, 1981, 160 с.
2. Арбузов В.А., Дубнищев Ю.Н. Методы гильберт–оптики в измерительных технологиях Новосибирск: Изд–во НГТУ, 2007, 316 с.
3. Дубнищев Ю.Н. Теория и преобразование сигналов в оптических системах. СПб.: Издательство Лань. – 2011. – 384 с.
4. Арбузов В.А., Дубнищев Ю.Н., Лебедев А.В и др. Наблюдение крупномасштабных гидродинамических структур в вихревой трубке и эффект Ранка // Письма в ЖТФ. – 1997. – Т. 23, № 23. – С. 84–90.
5. Arbuzov V.A., Dvornicov N.A., Dubnishchev Yu.N. Detecting Opposite Vortex Rings Formated During Pressure Front Diffraction on a Hole // Techn. Phys. Lett. – 2008. – Т. 34, No 5. – P. 394–396.
6. Дубнищев Ю.Н., Дворников Н.А., Нечаев В.Г., Новосёлова О.Н. Полихроматическая гильберт–диагностика эволюции вихревых колец, индуцированных скачком давления на отверстии // Автометрия. – 2012. – Т. 48, № 3. – С. 13–21.
7. Eu J.K.T., Lohmann A.V. Isotropic Hilbert Spatial Filtering // Opt. Commun. – 1973. – 9, No 3. – P. 257–262.
8. Арбузов В.А., Арбузов Э.В., Буфетов Н.С., Шлапакова Е.О. Гильберт–диагностика рэлей–бенаровской конвекции в жидкости // Автометрия. – 2012. – Т. 48, № 3. – С. 61–67.
9. Антонов П.В., Арбузов В.А., Бердников В.С., Гришков В.А., Новосёлова О.Н., Тихоненко В.В. Экспериментальные и численные исследования нестационарных плавучих струй // Автометрия. – 2012. – Т. 48, № 3. – С. 90–100.

V.A. Arbuzov^{1,2}, Yu.N. Dubnishchev^{1,2}, N.A. Dvornikov¹, V.G. Nechaev², O.N. Novosyolova²,
D.S. Pechkin

**OPTICAL DIAGNOSTICS OF COMPLEMENTARY VORTICAL RINGS INDUCED IN
AIR BY AN IMPULSE OF PRESSURE ON A HOLE**

¹*Institute of thermophysics
Siberian branch of the Russian academy of sciences,
Russia 630090, Novosibirsk, an avenue of Academic Lavrentyev, 1
E-mail: dubnistchev@itp.nsc.ru*
²*Novosibirsk state technical university
Russia 630092, Novosibirsk, K. Marx's avenue, 20.*

Hilbert–visualization of phase disturbances in light fields is discussed. Evolution of the complementary vortex rings induced in the air by an impulse of pressure on an aperture in a wall of the chamber is experimentally investigated. Numerical modelling structure of the vortical rings is executed.

FLOW VISUALIZATION; THE HILBERT–OPTICS; VORTEX RINGS.