

03;07

## **Обнаружение противоположно направленных вихревых колец при дифракции фронта давления на отверстии**

© В.А. Арбузов, Н.А. Дворников, Ю.Н. Дубнищев

Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный технический университет  
E-mail: dubnistchev@itp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 16 августа 2007 г.

Обнаружен эффект возникновения вихревых колец, перемещающихся в противоположных направлениях, при дифракции фронта давления на отверстии в плоской стенке.

PACS: 47.32.cf

Вихревые кольца как объект исследования традиционно пользуются заслуженной популярностью. Выполнены глубокие теоретические и экспериментальные исследования динамической структуры вихревых колец [1,2]. Интерес к ним обусловлен важностью понимания процессов вихреобразования в фундаментальных и прикладных задачах газодинамики. Казалось бы, вихревые кольца досконально изучены и вошли в арсенал эффективных демонстрационных опытов в аудиториях (достаточно вспомнить Р. Вуда или М.А. Лаврентьева). Однако актуальность создания экспериментально обоснованных моделей, адекватно описывающих эволюцию вихревых колец от зарождения до распада, все еще сохраняется. Предметом данного сообщения является впервые обнаруженное явление, заключающееся в формировании перемещающихся в противоположных направлениях вихревых колец, которые возникают при дифракции фронта давления на отверстии в плоской стенке.

Рассматривалась задача зарождения тороидальных вихрей при внезапной разгерметизации цилиндрической полости с повышенным давлением газа. Для расчетов использовались уравнения Навье–Стокса для ламинарного, сжимаемого осесимметричного течения. Устройство для

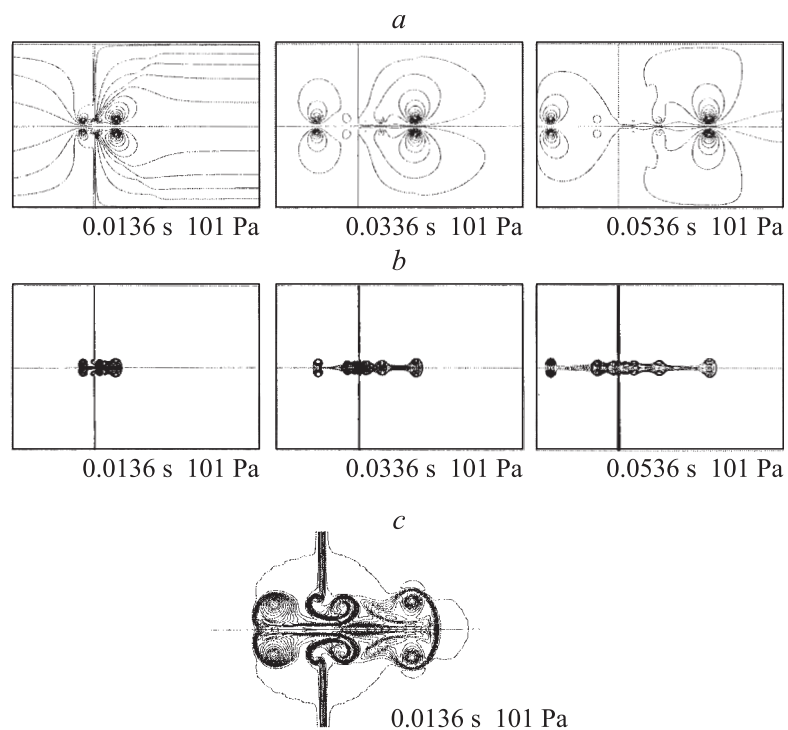
генерации тороидальных вихрей, рассмотренное при моделировании, представляло собой цилиндрическую камеру диаметром 0.2 м, разделенную перегородкой с отверстием, радиус которого 0.01 м. Перегородка разделяет камеру на секцию с повышенным давлением и секцию с атмосферным давлением. Длина первой секции — 0.1 м. Вторая секция имела длину 0.2 м. Секция с атмосферным давлением открыта в атмосферу. Секция с повышенным давлением закрыта с торца стенкой. В результате численного моделирования показано, что в этих условиях формируются тороидальные вихри, перемещающиеся вдоль оси отверстия в противоположных направлениях от разгерметизированной стенки.

На рис. 1 показаны линии тока (*a*), плотность газа (*b*) и плотность газа в окрестности отверстия в увеличенном масштабе (*c*) в вихрях, перемещающихся как в прямом, так и в обратном направлении при перепаде давления в 101 Па. На рисунках 1, *d* и *e* приведены аналогичные данные по линиям тока и плотности газа при перепаде давления в 1010 Па. Видно, что при увеличении перепада давления вихрь в обратном направлении больше запаздывает в своем развитии, чем при более низком перепаде давления.

Если построить продольные координаты центра вихря в зависимости от времени, то они ложатся на прямые линии, по которым можно определить, что при перепаде 101 Па время запаздывания прямого вихря 0.002 с, обратного 0.036 с, скорость прямого вихря 2.15 м/с, обратного 1.67 м/с. Аналогично при перепаде давления 1010 Па время запаздывания прямого вихря 0.0009 с, обратного 0.0087 с, скорость прямого вихря 15.2 м/с, обратного 1.62 м/с.

Трудность экспериментального обоснования результатов моделирования была связана со слабым возмущением оптической плотности при низких перепадах давления. Для регистрации таких возмущений мы воспользовались методами оптической гильберт-фильтрации световых полей [3]. В эксперименте обоснование результатов численного моделирования выполнялось методами оптической гильберт-диагностики. Для этого применялся серийный теневой прибор ИАБ-463М, в котором использовались модифицированная система оптической фильтрации в сочетании с „точечным“ и щелевым источниками освещения. Поле зрения оптической системы ИАБ-463М имеет диаметр 400 мм. Регистрация выполнялась ССD-камерой.

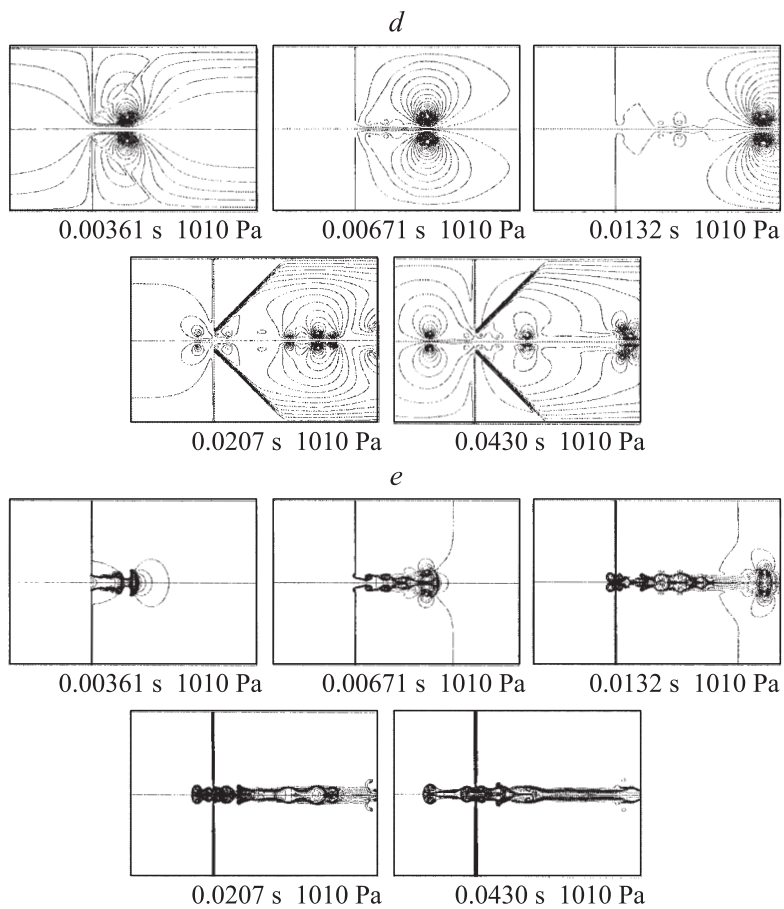
Камера генератора вихревых колец имела размеры  $0.19 \times 0.19 \times 0.38$  м. В передней стенке камеры имеется отверстие диаметром



**Рис. 1.** Линии тока (*a*, *d*, *c*) и плотность газа (*b*, *e*) в последовательные моменты времени, отсчитанные от начала разгерметизации диафрагмы, разделяющей зону с повышенным давлением внутри камеры и атмосферным давлением вне ее. Превышения давления составляют: *a*, *b*, *c* — 101 Па, *d*, *e* — 1010 Па.

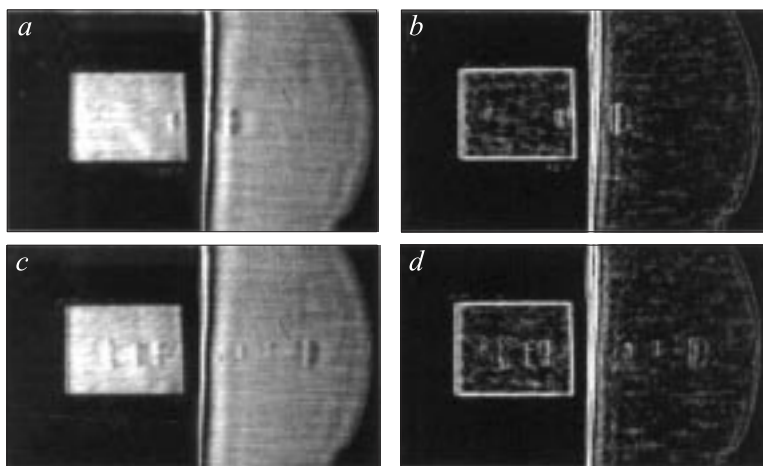
20 mm, толщина стенки 5 mm. Задняя стенка камеры образована диффузором электродинамического громкоговорителя. В боковые стенки вставлены высококачественные оптические окна для наблюдения вихревых структур внутри камеры. Электродинамический генератор управлялся электрическими импульсами прямоугольной формы, полярность, амплитуда и скважность которых могли изменяться. Импульсный сигнал снимался с выхода звуковой платы компьютера и через усилитель поступал на вход электродинамического генератора.

В эксперименте с помощью CCD-камеры регистрировались гильберт-теннограммы вихревых структур, формирующихся вне и внутри



**Рис. 1** (продолжение).

камеры генератора. На рис. 2 показаны примеры гильберт-теннеграмм вихревых структур в натуральном виде (слева) и с подавлением низкочастотного шума (справа). Тороидальные вихревые структуры, представленные на этих гильберт-теннеграммах, образованы при положительном скачке давления в камере. В подтверждение выводов численного моделирования хорошо видны вихри, возникающие вне и внутри камеры и распространяющиеся в противоположных направлениях.



**Рис. 2.** Гильберт-теннеграммы оптических полей плотности вихревых структур, иллюстрирующие развитие вихрей в начальный (*a, b*) и в последующий (*c, d*) моменты времени. *b, d* — гильберт-теннеграммы с подавленными низкочастотными шумами.

В этих реализациях скорость распространения тороидальных вихрей вне камеры  $2.06 \text{ m/s}$ , скорость вихрей, распространяющихся в противоположном направлении от отверстия, внутри камеры  $1.58 \text{ m/s}$ . Эти данные находятся в удовлетворительном согласии с численными оценками для перепада давления  $101 \text{ Pa}$ .

Были получены также гильберт-теннеграммы, отображающие процесс формирования и распространения в противоположных направлениях тороидальных вихревых структур, возникающих при отрицательном скачке давления внутри камеры. В этом случае наблюдались режимы, при которых скорость движения вихрей внутри камеры была выше, чем снаружи.

Визуализация вихревых структур осуществлялась с применением биквадрантной гильберт-фильтрации и щелевого источника света, что обеспечивало одномерное гильберт-преобразование оптического сигнала. В целом эксперимент подтверждает результаты численного моделирования.

Образование вихревых структур в рассмотренной задаче можно описывать как дифракцию ударной волны на отверстии в стенке [4].

В результате вне и внутри камеры образуются дифрагированные поля давления со структурой, описываемой функцией типа  $\sim p \frac{J_1(aw)}{aw}$ . Здесь  $J_1(aw)$  — функция Бесселя,  $a$  — радиус отверстия,  $p$  — амплитуда скачка давления,  $w$  — пространственная частота в фурье-плоскости, ортогональной оси цилиндрической симметрии системы.

Знаки главного и боковых дифракционных максимумов этой функции чередуются, в результате чего дифракционное поле давления индуцирует вихревые структуры тороидального типа, распространяющиеся в противоположных направлениях от стенки.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 05-02-16896 и 05-08-50308).

## Список литературы

- [1] Копьев В.Ф., Чернышов А.С. // УФН. 2000. Т. 170. № 7. С. 713–742.
- [2] Akhmerov D.G. // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2001. V. 42. N 5. P. 794–805.
- [3] Дубнищев Ю.Н., Арбузов В.А., Белоусов П.П., Белоусов П.Я. Оптические методы исследования потоков. Новосибирск: Сибирское университетское изд-во, 2003. 418 с.
- [4] Дубнищев Ю.Н. Теория и преобразование сигналов в оптических системах. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. 276 с.