

03

Экспериментальное определение времени образования торнадоподобного вихря в замкнутой камере

© Д.Г. Ахметов, В.В. Никулин

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

E-mail: nikulin@hydro.nsc.ru

Поступило в Редакцию 12 мая 2008 г.

Установлены экспериментальные закономерности для времени образования торнадоподобного вихря в замкнутой камере при измерении объемного расхода воздуха, подаваемого в камеру, и интенсивности его закрутки. Дана физическая интерпретация полученных эмпирических закономерностей.

PACS: 74.32.Ef, 47.32.C-

Исследованию закрученных течений жидкости и газа в вихревых камерах посвящено значительное количество работ в связи с широким использованием таких течений в различных технических устройствах [1]. Однако в большинстве работ изучались в основном установившиеся режимы течений, а интересные с научной точки зрения вопросы формирования торнадоподобных вихрей остаются не выясненными. Определение закономерностей образования вихря представляет и практический интерес, так как закрученное течение, например, может быть использовано для быстрого удаления загрязняющих примесей из атмосферы замкнутых помещений [2]. В случаях, когда требуется экстренное удаление загрязнений из атмосферы замкнутых помещений, возникает необходимость в определении времени формирования вихревого течения, так как время формирования вихря связано с временем удаления загрязнений.

Экспериментальная установка представляет собой замкнутую камеру в форме параллелепипеда с прозрачными стенками из оргстекла (рис. 1). Размер основания камеры в горизонтальной плоскости 0.435×0.51 м, ее высота может варьироваться путем установки горизонтальной перегородки. Высота камеры без перегородки $H = 0.35$ м. Внутри камеры к ее верхней крышке I прикреплена снизу с зазором

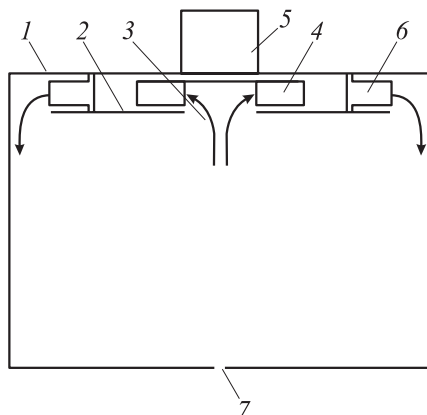


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

0.01 m прямоугольная пластина 2 с отверстием 3 в центре диаметром 0.05 m. Размеры пластины 2 меньше размеров крышки камеры; расстояния от ее внешних кромок до боковых стенок камеры составляют 0.045 m. Таким образом, объем камеры без перегородки за вычетом области, отделяемой пластиной, равен $V = 75.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$. Воздух из камеры отсасывается через центральное отверстие 3 в пластине 2 центробежным вентилятором 4, 5 (4 — крыльчатка, 5 — электродвигатель) и выбрасывается через зазор между пластиной и крышкой камеры снова в камеру к ее боковым стенкам. Выход из зазора частично перекрыт так, что воздух при выходе из него проходит через систему направляющих лопаток 6, оси которых расположены на сторонах прямоугольника размером $0.22 \times 0.3 \text{ m}$, симметрично относительно центров соответствующих сторон. Длина, занятая лопатками, с каждой стороны равна 0.06 m. При повороте лопаток на угол φ относительно перпендикуляра к соответствующей стороне поток, вытекающий из зазора, получает вращательное движение вокруг вертикальной оси камеры. Путь движения воздуха указан на рис. 1 стрелками. В опытах скорость потока воздуха между направляющими лопатками определялась с помощью формулы Бернулли по измерению перепада давлений в зазоре до лопаток (где скорость близка к нулю) и между лопатками. Кроме того, регистрировалась разность давлений на дне камеры в точке 7 и вне камеры.

После включения двигателя через некоторое время в камере образуется торнадоподобный вихрь. Известно [3], что из-за вращения воздуха статическое давление в ядре вихря ниже, чем в окружающем его пространстве. Поэтому в качестве времени образования вихря в опытах принимался промежуток времени T между пуском двигателя, приводящего во вращение крыльчатку вентилятора 4, и началом резкого падения давления в отверстии 7 на дне камеры. Момент пуска двигателя определялся по изменению величины тока, протекающего через небольшое сопротивление, включенное последовательно с двигателем. Сигналы с датчика давления и сопротивления регистрировались двулучевым цифровым осциллографом. Проводилось 5–6 измерений в одинаковых условиях; и в качестве результата принималось среднее значение промежутка времени от момента пуска двигателя до момента резкого падения давления над отверстием 7. В экспериментах варьировались угол поворота лопаток φ , величина объемного расхода воздуха q и высота камеры.

Основная серия экспериментов проведена без горизонтальной перегородки, при значениях угла установки лопаток $\varphi = 15, 30, 45, 60^\circ$ и при изменении расхода воздуха q в диапазоне $(6-40) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$. Кроме того, с целью выявления влияния геометрии камеры были выполнены эксперименты при уменьшении H до 0.184 и 0.094 м. Величину закрутки потока воздуха, поступающего в камеру, удобнее характеризовать не углом поворота лопаток β , а безразмерным параметром закрутки [1], так как угол поворота является характеристикой конкретной установки, а параметр закрутки имеет более универсальный характер. В качестве параметра закрутки s примем отношение потока момента импульса, вытекающего в камеру из промежутков между лопатками β , к потоку импульса, вытекающего из камеры воздуха через выходное отверстие 3, умноженному на радиус этого отверстия [4]. Для данной установки $s = \pi d(L_1 + L_2) \operatorname{tg} \varphi / (8\Sigma)$, где L_1, L_2 — длины сторон прямоугольника, на которых расположены оси лопаток, Σ — суммарная площадь проходного сечения между лопатками при значении $\varphi = 0$, $\Sigma = 22 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$. Тогда при значениях угла φ , равных $15, 30, 45, 60^\circ$, величина параметра закрутки s принимает соответственно значения 1.24, 2.68, 4.64, 8.04, т. е. s изменяется в 6.5 раза. Такой диапазон изменения s достаточно широк и охватывает большую часть встречающихся на практике значений s .

Наблюдения показали, что положение вихря в камере не стационарно в пространстве, его нижняя часть блуждает по дну камеры в окрестности отверстия 7 с амплитудой порядка видимого диаметра

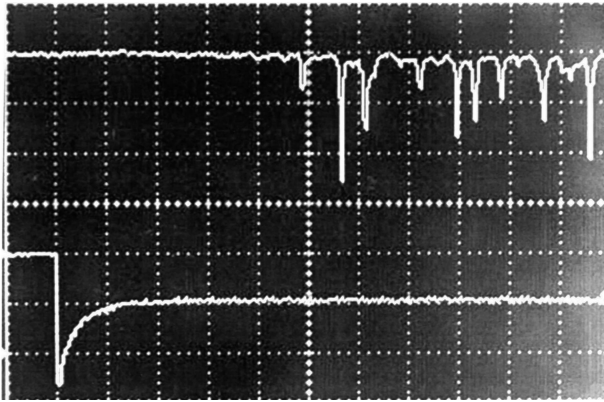


Рис. 2. Осциллограммы изменения давления относительно атмосферного в центре дна камеры (верхняя) и величины тока через электродвигатель, обеспечивающий циркуляцию воздуха (нижняя).

вихревого столба. На рис. 2 приведены типичные осциллограммы изменений во времени давления в камере над отверстием 7 (верхняя кривая) и величины электрического тока, протекающего через электродвигатель при его пуске (нижняя кривая).

Представленные на рис. 2 осциллограммы получены при значениях параметров $\varphi = 15^\circ$ и $q = 24.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, цена большого деления на оси абсцисс равна 1 s. В опытах при других значениях параметров φ и q получаются качественно аналогичные осциллограммы. Почти периодические падения давления в виде отрицательных импульсов на рис. 2 объясняются блужданиями нижнего конца вихря по дну камеры. Положения импульсов давления соответствуют моментам времени, когда ось вихря максимально приближается к отверстию 7, а разница в амплитуде импульсов обусловлена различием расстояний сближения. Резкий спад кривой на нижней осциллограмме соответствует моменту включения двигателя, нарастающий участок кривой — выходу оборотов двигателя на стационарный режим вращения. В качестве времени образования вихря T принят промежуток времени между моментом резкого спада нижней кривой и моментом появления первого импульса на верхней кривой. Согласно рис. 2, в данном случае $T \approx 4.8 \text{ s}$.

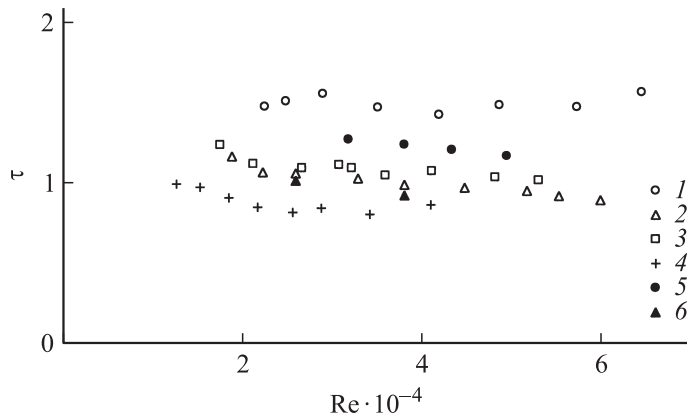


Рис. 3. Безразмерное время формирования торнадоподобного вихря τ в зависимости от безразмерного расхода при различных закрутках и объемах камеры.

Результаты исследования зависимости времени T образования торнадоподобного вихря от параметров φ и q приведены на рис. 3. По вертикальной оси отложено безразмерное время $\tau = Tq/V$ (его физический смысл — отношение времени образования вихря к характерному времени обновления воздуха в камере), по горизонтальной — безразмерный расход, записанный в виде числа Рейнольдса $Re = 4q/(\pi d\nu)$, d — диаметр выходного отверстия, $\nu = 15 \cdot 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$ — кинематический коэффициент вязкости воздуха. Символ 1 соответствует $\varphi = 15^\circ$, 2 — 30° , 3 — 45° , 4 — 60° , $H = 0.35 \text{ m}$, 5 — $\varphi = 15^\circ$, 6 — 30° , $H = 0.184 \text{ m}$.

Из рис. 3 следует, что безразмерное время τ практически не зависит от Re (т.е. от q) и слабо убывает с ростом s . Кроме того, из рис. 3 следует, что для приведенных данных величина τ по порядку величины равна единице, т.е. время образования торнадоподобного вихря приблизительно равно характерному времени обновления воздуха в камере. Для короткой камеры при уменьшении высоты до 0.094 m (примерно в четыре раза) данная закономерность нарушается и величина τ заметно возрастает. Вопрос формирования вихря в короткой камере требует отдельного изучения.

Погрешность определения времени T по осциллограммам не превышает 5%. Основная погрешность определения T связана блужданиями нижнего конца вихревой трубки по дну камеры. Резкие падения давления в виде импульсов проявляются лишь в тех случаях, когда ядро приближается к отверстию. Из полученных осциллограмм изменений давления в отверстии 7 следует, что ядро вихря подходит к отверстию почти периодически, как это видно по верхней кривой на рис. 2. Почти периодический характер появления минимумов давления свидетельствует, что разность времени между моментами возникновения вихря и его наибольшего приближения к отверстию 7 с равной вероятностью изменяется от 0 до одного квазипериода блуждания вихря по дну камеры. Тогда среднее значение этой разности по 5–6 измерениям составит половину периода. Эта величина во всех опытах не превышала 15% от измеренного времени образования вихря. Тогда общая погрешность определения времени формирования вихря не превышает 20%.

Таким образом, впервые проведены измерения времени образования торнадоподобного вихря в замкнутой камере. Установлено, что время формирования вихря слабо зависит от закрутки и примерно обратно пропорционально расходу. В случае, когда вертикальные и горизонтальные размеры камеры близки, оно приблизительно равно характерному времени обновления воздуха в камере. Полученные закономерности могут быть использованы для оценок времени образования вихревого течения данного типа в замкнутых помещениях, а также при разработке теоретических моделей формирования торнадоподобных вихрей.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 08-08-00577-а и NATO grant SfP „Agents Decontamination“ N 9811461.

Список литературы

- [1] *Гупта А., Лилли Л., Сайред Н.* Закрученные потоки. М.: Мир, 1987. 588 с. (Gupta A.K., Lilley D.G., Syred N. Swirl Flows. Abacus Press, 1984).
- [2] *Ахметов Д.Г., Никулин В.В.* Заявка на изобретение № 2007141553/06(045491).
- [3] *Ward N.* // J. Atmos. Sci. 1972. V. 29. N 6. P. 1194.
- [4] *Ахметов Д.Г., Никулин В.В., Петров В.М.* // Изв. РАН. МЖГ. 2004. № 3. С. 60.