

03

## **Динамика переноса дыма от локализованного источника торнадоподобным вихрем**

© В.В. Никулин, В.С. Соболев, А.И. Скурлатов

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

E-mail: nikulin@hydro.nsc.ru

Институт автоматки и электрометрии СО РАН, Новосибирск

Поступило в Редакцию 12 марта 2009 г.

Экспериментально исследуется динамика переноса модельной примеси (дыма) торнадоподобным вихрем от локализованного источника, расположенного вблизи его основания. Установлено существование такого режима течения, когда, наряду с массопереносом вдоль оси вихря, между его ядром и окружающей атмосферой происходит массообмен в виде регулярных выбросов спиралевидных образований от ядра вихря. Данный процесс реализуется при стационарных условиях на входе и выходе из камеры, что указывает на автоколебательный характер рассматриваемого течения.

PACS: 47.32.Ef, 47.32.C-

Известно, что природные смерчи [1], а также их аналоги в технических и лабораторных устройствах — торнадоподобные вихри захватывают с нижней поверхности вблизи основания воздух вместе с мелкодисперсными загрязнениями и переносят их внутри ядра вдоль всей его высоты. Это свойство используется, в частности, для визуализации подобных течений [2,3]. Способность торнадоподобных вихрей захватывать и уносить газообразные и мелкодисперсные загрязнения может найти технические применения, например, для очистки воздуха [4]. Преимуществом такого способа является то, что с помощью торнадоподобного вихря можно организовать дистанционное удаление загрязнений, так как длина ядра вихря в десятки раз превышает его диаметр [2]. В то же время эффективность переноса примесей внутри ядра вихря неизвестна, в частности, уносятся они полностью или часть из них попадает в окружающую атмосферу. Данный вопрос представляет научный интерес, поскольку массообмен между ядром вихря и

окружающим пространством до настоящего времени практически не исследован. Некоторые результаты были получены для течения между соосными вращающимися дисками [5]. Однако в случае торнадоподобных вихрей исследований конвективного переноса и массообмена практически нет, что связано со сложным трехмерным нестационарным характером течения.

Экспериментальная установка представляет собой замкнутую камеру в форме прямоугольного параллелепипеда как наиболее адекватную модель реального помещения, а также многих технологических устройств [6]. Стенки камеры изготовлены из прозрачного оргстекла. Ее горизонтальные размеры  $435 \times 510$  mm, высота 350 mm. Воздух отсасывается из камеры через выходное отверстие диаметром  $d = 28$  mm, расположенным в центре верхней крышки. Под действием возникшего разряжения воздух поступает в камеру снаружи через два патрубка диаметром  $d_1 = 27$  mm. Патрубки входят в камеру вертикально через отверстия, расположенные на диагонали верхней прямоугольной крышки симметрично относительно оси выходного отверстия на расстояниях 270 mm. После входа в камеру направление патрубков становится горизонтальным, длина горизонтальных участков 120 mm. Оси горизонтальных участков находятся на высоте 70 mm от верхней крышки, и их продолжения проходят симметрично относительно оси выходного отверстия на расстояниях  $L = 100$  mm. Таким образом, втекающий через входные патрубки воздух обладает потоком момента импульса относительно оси выходного отверстия, что необходимо для создания торнадоподобного вихря. Дым поступает в камеру также под действием образованного в ней разряжения из контейнера объемом  $0.12 \text{ m}^3$  через отверстие диаметром 5.6 mm в центре дна камеры. Дым создается дымовой машиной F-900s и представляет собой частицы аэрозоли, радиус которых, оцениваемый по времени оседания дыма, не превышает  $1 \mu\text{m}$ . Таким образом, в условиях эксперимента частицы следуют за потоком и инерционные эффекты для них пренебрежимо малы.

Динамика переноса дыма регистрировалась скоростной цифровой видеокамерой с частотой съемки 25 кадров в секунду и длительностью экспозиции 20 ms. Съемки велись через боковую стенку и сверху. В последнем случае для подсветки течения использовался горизонтальный световой нож шириной 20 mm, создаваемый непрозрачным экраном на боковой стенке с соответствующей прорезью, освещаемый широким

пучком света. Для получения количественных характеристик величины задымленности измерялось рассеянное дымом лазерное излучение при его рассеянии „вперед“ от горизонтального луча лазера мощностью 10 mW, длиной волны 0.65  $\mu\text{m}$ . Интенсивность рассеянного излучения была пропорциональна количеству дыма в зондируемой области. Луч проходил через камеру со стороны стенок, имеющих ширину 510 mm, под углом, близким к нормали. Луч лазера и свет оптического ножа располагались на высоте 140 mm над дном, т.е. вблизи середины камеры. Методами пространственной фильтрации, для исключения шумового сигнала от стенок камеры, регистрировалось в основном излучение, рассеянное внутри камеры с расстояний, отстоящих от ее стенок на 60 mm, т.е. на длине, примерно равной 300 mm.

В экспериментах объемный расход воздуха составлял  $4.7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ , что соответствовало входной скорости 4.1 m/s. Поскольку площадь отверстия для дыма в 46 раз меньше суммарной площади входов, то и расход дыма был, по крайней мере, во столько же раз меньше общего расхода, т.е. подача дыма не могла влиять на картину течения и служила целям визуализации.

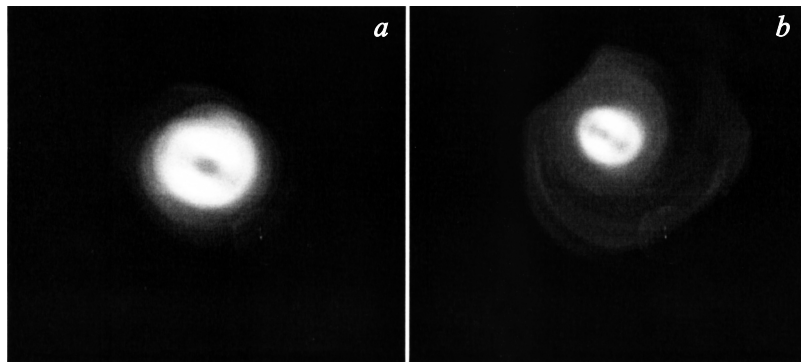
После включения отсоса в камере образуется торнадоподобный вихрь. Вихрь не стационарен в пространстве. Его ядро прецессирует относительно оси выходного отверстия [6.7], причем амплитуда прецессии увеличивается по мере удаления от выхода. Форма ядра также подвержена возмущениям.

На рис. 1, 2 представлены кадры, показывающие особенности динамики переноса дыма: на рис. 1 — фотография, сделанная через боковую стенку камеры, на рис. 2 — кинокадры, сделанные сверху при щелевом освещении. Диаметр задымленной области (ядра) в среднем примерно равен 25 mm. Видно, что дым, поступающий в камеру, практически полностью захватывается в ядро вихря и переносится в нем к выходному отверстию (рис. 1). Однако данная картина наблюдается не постоянно. Регулярно, но не строго периодически, происходит выброс дыма из ядра (в основном из внешней его части) в окружающее пространство в виде спиралевидных образований. Данный процесс иллюстрирует рис. 2: *a* — кадр до выброса, *b* — кадр в процессе выброса (через 0.16 s после предыдущего). Наиболее интенсивные выбросы происходят через промежутки времени в диапазоне от 5–6 до 10 s. Более мелкие выбросы возникают на разных высотах с регулярностью по порядку величины, равной 1 s, причем чем ближе к основанию, тем

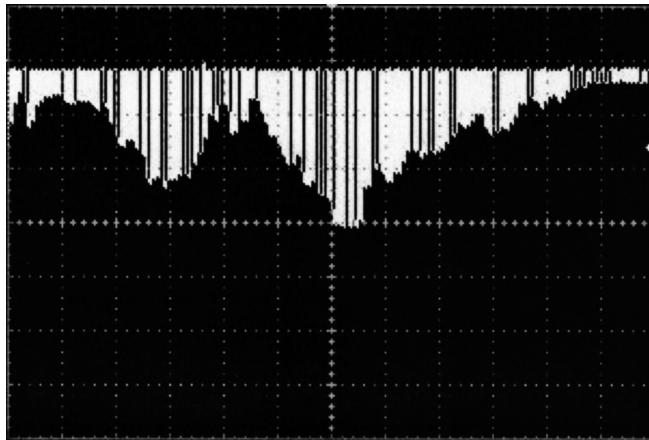


**Рис. 1.** Фотография торнадоподобного вихря, визуализированного дымом, поступающим в центре нижней поверхности.

чаще. На рис. 3 представлена осциллограмма величины интенсивности рассеянного излучения при прохождении луча через центр камеры. Изменения интенсивности связаны с прецессией ядра вихря. Благодаря прецессии происходит автоматическое сканирование вихря в горизонтальном сечении. Максимальная величина интенсивности рассеянного излучения, за вычетом шумового сигнала, превосходит минимальную примерно в 10 раз. Отсюда следует, что во столько же раз больше количество дыма при прохождении луча через ядро вихря, чем при прохождении мимо него. Так как диаметр ядра примерно на порядок



**Рис. 2.** Кинокадры динамики переноса дыма в ядре вихря, сделанные сверху с интервалом 0.16 s при горизонтальном ножевом освещении.



**Рис. 3.** Осциллограмма изменений интенсивности рассеянного дымом света при прохождении горизонтального луча лазера через камеру, вызванных прецессией ядра вихря. Цена большого деления по оси абсцисс 250 ms.

меньше длины области зондирования, то это означает, что концентрация дыма в ядре вихря более чем на два порядка превышает среднюю концентрацию дыма вне его.

Проведенные исследования показали, что наряду с массопереносом вдоль оси вихря, между его ядром (в основном внешней частью) и окружающей атмосферой происходит регулярный массообмен в виде выбросов спиралевидных образований от ядра вихря. Таким образом, механизм обмена, наблюдавшийся в течении между соосными вращающимися дисками [5], имеет более широкое распространение, он реализуется и в торнадоподобных вихрях. Данный массообмен приводит к выбросу дыма из ядра вихря. При этом концентрация дыма вне ядра остается незначительной по сравнению с концентрацией внутри его. Обнаруженные особенности массообмена представляют интерес для развития вихревых технологий, поскольку во многих из них процессы тепломассопереноса имеют большое значение.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 08-08-00577-а и NATO grant SFR „Agents decontamination“ № 981461.

## Список литературы

- [1] *Наливкин Д.В.* Ураганы, бури, смерчи. Л.: Наука, 1969. 487 с.
- [2] *Wan C.A., Chang C.C.* // J. Atmos. Sci. 1972. V. 29. N 1. P. 116–127.
- [3] *Никулин В.В.* // ПМТФ. 1980. № 1. С. 68–75.
- [4] *Ахметов Д.Г., Никулин В.В.* Устройство для очистки воздуха. Заявка на изобретение № 2007141553/06(045491).
- [5] *Ахметов Д.Г., Тарасов В.Ф.* // ПМТФ. 1988. № 5. С. 68–73.
- [6] *Alekseenko S.V., Shtork S.I.* // Russian J. of Eng. Thermophysics. 1992. V. 2. N 4. P. 231–266.
- [7] *Ахметов Д.Г., Никулин В.В.* // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 24. С. 36–41.