

УДК 551.508.5

М.В. Протасов, Т.Ф. Иванов, М.А. Горбачев

Учреждение Российской академии наук Объединенный институт высоких температур РАН, Россия, 125412, Москва, Ижорская ул., 13, стр. 2, E-mail: protasov m@mail.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДУШНЫХ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР, ОБРАЗУЮЩИХСЯ НАД НАГРЕТОЙ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Представлены результаты экспериментального исследования вихревых структур, образующихся в конвективном восходящем потоке воздуха над нагретой подстилающей поверхностью. С помощью метода анемометрии по изображениям частиц (PIV-метода) изучены динамические характеристики воздушных тепловых вихрей, визуализированных как с помощью дыма, так и магнезии. Приведены примеры измеренных пространственных полей мгновенных скоростей воздуха и завихренности вихрей.

ЭКСПЕРИМЕНТ, КОНВЕКЦИЯ, ВИХРЬ, ЗАВИХРЕННОСТЬ, РІV

введение

Вихревые течения широко распространены в природе и технике [1, 2]. Большое разнообразие воздушных вихревых структур можно наблюдать в сдвиговых течениях в пограничных слоях [3] и в атмосфере [4]. Существует множество способов образования вихревых структур, которые определяют их дальнейшее поведение. Некоторые закономерности формирования вихревых структур в жидкостях рассмотрены в [5].

Использование определения когерентных структур для описания процессов самоорганизации, включающих в себя процессы образования, эволюции и распада сложных пространственно-временных структур [6], а также крупномасштабного переноса массы тепла и импульса практически для всех возможных природных динамических систем, определило наличие междисциплинарного подхода к изучению свойств вихревых структур как распространенной природной аналогии. С точки зрения теории сложных систем гидродинамические вихревые образования можно отнести к когерентным структурам, которые могут образовываться благодаря неустойчивости среды какого-либо вида [7]. рассматриваются образования также теорией Вихревые автоволн, изучающей самоподдерживающиеся волновые процессы параметров систем в самых различных средах физического, химического и биологического происхождения [8].

Теоретические и экспериментальные результаты по исследованию вихревых режимов неустойчивых течений с успехом могут применяться как в геофизической гидродинамике для моделирования крупномасштабных атмосферных процессов [4], так и в других приложениях общей физики, для описания процессов в атмосферах других планет, в плазме, и др. средах.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальная установка и метод измерений

Используемая в работе экспериментальная установка и параметры температурных режимов нагретой подстилающей поверхности, приводящие к генерации воздушных вихрей, подробно описаны в [9]. Установка (рис. 1) позволяет осуществлять контролируемый нагрев с помощью газовой горелкой (максимальная тепловая мощность – 3,5 кВт) металлической подстилающей поверхности из алюминиевого листа диаметром 1100 мм и толщиной 1,5 мм. Для визуализации образуемых вихревых структур применялись частицы-трассеры (частицы магнезии микрометровых размеров), которые наносились тонким слоем на подстилающую поверхность перед проведением экспериментов. Вторым способом осуществления визуализации генерируемых вихрей являлось использование дыма, получаемого при испарении нанесенной на подстилающую поверхность специальной жидкости (VDLSL5, фирмa Velleman, Бельгия).

Для нахождения полей скорости в горизонтальном сечении использовалась измерительная система PIV «ПОЛИС», разработанная и изготовленная в Институте теплофизики СО РАН (ИТ СО РАН).



Рис. 1. Схема PIV эксперимента и измерительной области при исследовании гидродинамической структуры воздушных тепловых вихрей: 1 – нагреваемая поверхность, 2 – лазер, 3 – оптическая насадка, 4 – лазерный нож, 5 – светоотражающие частицы, 6 – цифровая видеокамера, 7 – вихревой поток

Измерительная система включает в себя двойной импульсный Nd-YaG-лазер (длина волны 532,05 нм, мощность импульса не менее 5х106 Вт; длительность импульса не более 5 нс; частота повторения импульсов 1 – 8 Гц), блок управления и блоком питания лазера; апертуру лазера; две цифровые камеры 4MPix, имеющие формат изображения 2048×2048 (размер пикселя 7,4×7,4 мкм, размер ПЗС матрицы 15,15×15,15 мм, кадровая частоту 3,4 Гц, время экспозиции 120 мс), синхронизатор работы лазера и видеокамер.

Измерения и обработка результатов проводились при помощи персонального компьютера с системой сбора и обработки данных, включающей в себя два контроллера камер и программный пакет ActualFlow, разработанный в ИТ СО РАН.

Методика измерения поля скорости состоит в следующем (рис. 1). Исследуемая область потока освещается при помощи создаваемого лазером светового ножа. Расстояние между плоскостью светового ножа и плоскостью нагреваемой поверхности составляло Z = 200 мм. Лазер генерирует два импульса с заданной задержкой по времени. Цифровые камеры регистрируют распределение интенсивности света в освещаемой области и передают данные на персональный компьютер. Все регистрируемое поле программно разбивается на ячейки (опросные области), внутри которых вычисляется корреляция изображений частиц и по максимуму коэффициента корреляции определяется среднее для данной ячейки значение двумерного вектора смещения, а по нему вычисляется значение скорости. Погрешность метода PIV зависит от многих факторов, таких как плотность распределения трассеров, величины задержки по времени, типа адаптивных алгоритмов расчетных процедур и т.д., и различна для разных режимов течения жидкости. Для приводимых здесь результатов погрешность измерения скорости не превышала 5 %.

Результаты и обсуждение

Визуализация течения

При изучении структуры вихревых образований в экспериментах успешно используют метод визуализации течения. Визуализация течения позволяет получить представления о природе течения, характерных размерах наблюдаемых структур и их сложность, а также ряде других свойств, которые необходимо учитывать при планировании эксперимента.

Далее, в этом разделе будут представлены полученные в ходе выполнения экспериментов результаты визуализации поперечного сечения вихревых структур в конвективных восходящих потоках воздуха над нагретой металлической поверхностью. Все цифровые изображения были получены с помощью PIV-метода. В большинстве случаев, при визуализации течения воздуха над нагретой поверхностью с помощью дыма, наблюдаемые в экспериментах картины течения были характерными для условий моделирования процессов смешения чистого воздуха с воздухом, содержащим примеси. Как показано в [10], при таких условиях флуктуации вертикальной скорости влияют на турбулентное перемешивание существенно сильнее по сравнению с флуктуациями скорости в горизонтальном направлении, в связи с чем, можно предположить, что структуры конвективного течения в поперечном направлении является более сложными и хаотичными по сравнению с таковыми продольного направления. Возможность образования в вертикальном лля случая конвективном потоке пространственных трехмерных структур, их пересечение и эволюции [11], делает наблюдаемые картины течения для анализа еще более сложными Помимо наблюдаемых в экспериментах хаотичных структур при конвективном вертикальном движения воздуха над нагретой поверхностью также можно было наблюдать отдельные моменты эволюции разномасштабных воздушных вихревых структур, вызванных различными механизмами неустойчивости.

На рис. 2 – 4 показаны сравнения цифровых фотографий, полученных в ходе эксперимента с рисунками, изображающих примеры известных механизмов образования вторичных вихревых течений.



Рис. 2. Фотография (а) и рисунок (б, [5]), демонстрирующие импульсный механизм образования «грибовидных» вихревых течений



Рис. 3. Фотография (а) и рисунок (б, [12]), демонстрирующие механизм образования на периферии вихря «спиральных» образований с вихревыми вторичными течениями



Рис. 4. Фотография (а) и рисунок (б, [12]), демонстрирующие механизм образования на периферии вихря «спиральных» образований с вихревыми вторичными течениями

Результаты визуализации течения, при которой были получены изображения крупномасштабных вихревых структур, имеющих выраженную локальную завихренность структуры потока и, в некоторых случаях идентифицируемые как свободные концентрированные вихри [1], представлены на рис. 5 – 8. Рисунки объединены попарно в целях их компактного размещения в докладе.



Рис. 5. Фотографии воздушных вихревых образований в горизонтальном сечении на расстоянии 200 мм от нагретой металлической поверхности



Рис. 6. Фотографии воздушных вихревых образований в горизонтальном сечении на расстоянии 200 мм от нагретой металлической поверхности



Рис. 7. Фотографии воздушных вихревых образований в горизонтальном сечении на расстоянии 200 мм от нагретой металлической поверхности



Рис. 8. Фотографии воздушных вихревых образований в горизонтальном сечении на расстоянии 200 мм от нагретой металлической поверхности

На рис. 6а, 6б и рис. 8а можно отметить ярко выраженную спиралевидную структуру течения, в качестве причины которой может являться либо механизм сдвиговой неустойчивости при образовании вихря [4, 5, 7] либо эффект аккумуляции примеси (частиц дыма) [13]. Вызывает интерес также наблюдаемое в некоторых примерах различие в концентрации примеси в центральной зоне вихрей. На представленных инвертированных фотографиях, где концентрация примеси незначительна эта область выглядит как светлый участок (рис. 56, 8 а,б).

Результаты измерений

В ходе выполнения исследования были проведены PIV-измерения некоторых кинематических характеристик наблюдаемых в экспериментах свободных концентрированных вихрей, а именно, полей мгновенных скоростей U, м/с и их завихренности ω_z , 1/с в сечении параллельном плоскости нагретой подстилающей поверхности. Таким образом, измерения проводились в плоскости светового ножа параллельной подстилающей поверхности на расстоянии Z = 200 мм.

С помощью найденных значений продольной U_x и поперечной U_y компонент измеренного мгновенного поля скоростей частиц-трассеров, завихренность потока вычислялась согласно правилу

$$\omega_z = \frac{\partial U_y}{\partial x} - \frac{\partial U_x}{\partial y} \,.$$

Пример визуализации вихревого течения с помощью дыма, измеренного поля (в плоскости *ху*) мгновенных скоростей и завихренностей показан на рис. 9, 10 и 11 соответственно.



Рис. 9. Фотография вихревого течения в плоскости xy при z = 200 мм



Рис. 10. Пространственное распределение мгновенной скорости течения в плоскости xy при z=200 мм



Рис. 11. Пространственное распределение завихренности течения в плоскости ху при z = 200 мм

Данные на рис. 11 позволяют определить размеры ядра вихря, которому соответствует локальная область высоких значений завихренности, что является характерным для зоны вихревого течения с твердотельным типом вращения, которое и определяет границы вихревого ядра.

Далее, на рис. 12 и рис. 13 приведены примеры визуализации течения, измеренных мгновенных полей скоростей и завихренности с помощью частиц магнезии и дыма соответственно, для моментов времени с интервалом $\Delta \tau = 0.8$ с.



Рис. 12. Фотографии вихревого течения (a, б), пространственные распределения мгновенной скорости (в, г) и завихренности (д, е), полученные в плоскости *xy* при *z*=200 мм для двух моментов времени: a, в, д – τ = 0 с; б, г, е – τ = 0,8 с



Рис. 13. Фотографии вихревого течения (a, б), пространственные распределения мгновенной скорости (в, г) и завихренности (д, е), полученные в плоскости *xy* при *z* = 200 мм для двух моментов времени: a, в, д – τ = 0 с; б, г, е – τ = 0,8 с

Из рис. 12 можно определить, что центральная область вихря за время $\tau = 0.8$ с переместилась из точки с координатами (165 мм, 71 мм) в точку с координатами (103 мм, 129 мм), что соответствует поступательной скорости перемещения его ядра равной 0,11 м/с.

Из рис. 13 видно, что центр вихря за время $\tau = 0.8$ с переместился из точки с координатами (82 мм, 96 мм) в точку с координатами (43 мм, 62 мм), что соответствует поступательной скорости перемещения его ядра 0,07 м/с.

Сравнение с теорией

Для произвольного момента времени τ осевая компонента завихренности для ламинарного вихря Бюргерса и Ламба-Озеена [1, 14], в которых за счет вязкости учитывается диффузия завихренности, имеет вид

$$\omega(r,\tau)=\frac{\Gamma}{4\cdot\pi\cdot\nu\cdot\tau}\cdot e^{-r^2/4\cdot\nu\cdot\tau},$$

где *Г* – циркуляция, *v* – кинематическая вязкость воздуха.

Азимутальная скорость и есть

$$u(r,\tau) = \frac{1}{r} \int_{0}^{r} \omega r dr = \frac{\Gamma}{2 \cdot \pi \cdot r} \cdot \left(1 - e^{-r^2/4 \cdot v \cdot \tau}\right). \tag{1}$$

В [2] приводится выражение для циркуляции, локального максимума скорости u_m и эффективного радиуса вихря r_m в виде

$$u_m = \frac{0.36 \cdot \Gamma}{\pi \cdot r_m}.$$
 (2)

Используя найденные в эксперименте экстремальные значения для скорости u_m и радиуса вихря r_m , можно найти профиль азимутальной скорости в виде

$$\frac{u}{u_m} = \frac{1.39}{(r/r_m)} \cdot \left(1 - \exp(-1.26\frac{r^2}{r_m^2})\right).$$
 (3)

Профиль скорости также можно найти с помощью формулы (1), используя выражение (2) и соотношение для τ и r_m в виде [14]

$$r_m = 2,24 \cdot \sqrt{\nu \tau}$$

В приближении равенства азимутальной компоненты и измеренной мгновенной скорости течения сравнение профилей скорости, найденных в эксперименте согласно данным рис. 12г и рис. 13в, с вычисленными по формуле (3) представлены на рис. 14 и 15 соответственно. Расчет по формуле (3) производился с использованием для каждого из вихрей средних значений u_m и r_m .



Рис. 14. Пространственное распределение мгновенной скорости частиц-трассеров (магнезии) для случая, изображенного на рис. 12г в сечениях, проходящих через точку с координатами (103 мм, 129 мм) с шагом по азимуту π/10. Символы – эксперимент, кривые – расчет по формуле (3)



Рис. 15. Пространственное распределение мгновенной скорости частиц-трассеров (дыма) для случая, изображенного на Рис. 13в в сечениях, проходящих через точку с координатами (82 мм, 96 мм) с шагом по азимуту π/10. Символы – эксперимент, кривые – расчет по формуле (3)

Приведенные результаты показывают удовлетворительное соответствие теоретической модели вязкого вихря Бюргерса вихревым течениям, наблюдаемым в экспериментах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью PIV-метода были изучены динамические характеристики воздушных тепловых вихрей, образующихся в восходящем потоке воздуха над нагретой подстилающей поверхностью. Визуализация течения показала сложную структуру вихревых образований в их поперечном сечении, что говорит о необходимости проведения детальных исследований как структуры тепловых вихрей, так и механизмов их образования. Измеренные профили скоростей вихревого течения удовлетворяют теоретической модели вязкого вихря Бюргерса.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке грантов Президента Российской Федерации (МК-785.2011.8) и РФФИ (11-08-90455-Укр_ф_а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеенко С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л. Введение в теорию концентрированных вихрей // Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2003. 504 с.

2. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения / Пиралишвили Ш.А., Поляев В.М., Сергеев М.Н.; Под ред. Леонтьева А.И. М.: УНПЦ «Энергомаш», 2000. 412 с.

3. Хлопков Ю.И., Жаров В.А., Горелов С.Л. Когерентные структуры в турбулентном пограничном слое // М.: МФТИ, 2002. 267 с.

4. Аэрогидродинамика окружающей среды / Скорер Р.; Пер.с англ. М.: Мир, 1980. 549 с.

5. **Мелешко В.В., Константинов М.Ю.** Динамика вихревых структур // Киев.: Науков думка, 1993. 280 с.

6. **Давыдов В.А., Зыков В.С., Михайлов А.С.** Кинематика волновых структур в возбудимых средах // УФН. 1991. Т. 161. № 8. С. 45–85.

7. Введение в теорию гидродинамической неустойчивости / Дразин Ф.; Пер. с англ. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 288 с.

8. Должанский Ф.В., Крымов В.А., Манин Д.Ю. Устойчивость и вихревые структуры квазидвумерных сдвиговых течений // УФН. 1990. Т. 160. № 7. С. 1–47.

9. Вараксин А.Ю., Ромаш М.Э., Копейцев В.Н., Таекин С.И. О возможности физического моделирования воздушных смерчей в лабораторных условиях // ТВТ. 2008. Т. 46. №6 . С. 957–960.

10. Malinowski S.P., Andrejczuk M., Grabowski W.W. et al. Laboratory and modeling studies of cloud–clear air interfacial mixing: anisotropy of small-scale turbulence due to evaporative cooling // New J. of Phys. 2008. V. 10. 15 p.

11. Bratsun D.A., Zyuzgin A.V., Putin G.F. Nonlinear dynamics and pattern formation in a vertical fluid layer heated from the side // Int.J.Heat and Fluid Flow. 2003. V. 24. № 6. pp. 835-852. 12. Salmon R., Flieri G., Campbell L.A. Rotating convection // Woods Hole Oceanog. Ins. Tech. Rept., WHOI-96-09.1995. 321 p.

13. **Лебедева Н.А., Осипцов А.Н.** Структура зон аккумуляции примеси в течении типа торнадо // МЖГ. 2009. №1. С. 83–96.

14. Сэффмен Ф.Дж. Динамика вихрей. М.: Научный мир, 2000. 376 с.

M.V. Protasov, T.F. Ivanov, M.A. Gorbachev

Institution of the Russian Academy of Sciences Joint Institute for High Temperatures, Russia, 125412, Moscow, Izhorskaya st., 13, str. 2, E-mail: protasov_m@mail.ru

EXPERIMENTAL STUDY OF AIR VORTEX STRUCTURES GENERATED OVER A HEATED HORIZONTAL METAL SURFACE

The results of the original experimental study of the air vortex structures formed over a heated underlying metal surface are presented. The PIV method was used for study of the dynamic characteristics of hot air vortex, at visualized by the smoke, and magnesia. The spatial field of instantaneous velocities and vorticity of air over the underlying surface are measured.

EXPERIMENT, CONVECTION, SWIRLING, VORTEX, VORTICITY, EDDIES, PIV