

О возможности использования PIV для изучения двухфазных нестационарных вихрей

А. А. Мочалов

Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва
125412, Россия

E-mail: artem.mochalov@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 22 декабря 2022 г.

Аннотация. Рассмотрены некоторые экспериментальные приемы для изучения двухфазных нестационарных вихрей методом бесконтактной анемометрии по изображениям частиц “PIV”. Показан пример визуализации крупной вихревой воронки малоинерционными частицами-трассерами. Показано характерное векторное поле крупного двухфазного нестационарного вихря. Продемонстрирован методический прием по оценке положения центра нестационарного вихря и отслеживанию его перемещения в плоскости измерений. <https://doi.org/10.33849/2022208>

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование особенностей движения дисперсной фазы (капель, частиц, осколков) в торнадоподобных вихрях представляет значительный интерес вследствие нескольких причин. Во-первых, наличие дисперсной фазы визуализирует атмосферные вихри. Во-вторых, измеряя скорость взвешенных малоинерционных частиц, можно получать необходимую информацию о динамике (поля скорости) воздушного вихря [1]. В-третьих, при определенной концентрации дисперсная фаза может оказывать существенное влияние на характеристики атмосферного вихря и его поведение [2]. В-четвертых, присутствие осколков и других дисперсных включений может вносить решающий вклад в негативные последствия торнадо [3]. Известны экспериментальные работы по исследованию торнадоподобных крупных вихревых структур [4–6], авторами которых не ставился акцент по нахождению центра вихревой воронки; в том числе в экспериментах показаны квазистационарные механически закрученные вихревые структуры.

Цель настоящей работы — рассмотреть особенности применения PIV (Particle Image Velocimetry) методики измерений для изучения двухфазных нестационарных вихрей и показать методический прием по оценке положения центра нестационарного вихря и отслеживанию его перемещения в плоскости измерений.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Основными объектами исследования являются нестационарные концентрированные вихри [7], генерация которых осуществляется благодаря созданию неустойчивой стратификации воздуха. На рисунке 1 показана упрощенная схема основной экспериментальной установки, оснащенной системой диагностики полей скорости “Полис – PIV”. Основными элементами экспериментальной установки являются (рисунок 1(a,b)): 1 — кросскорреляционная камера, 2 — несущий каркас установки, 6 — сдвоенный импульсный лазер, 8 — подстилающая поверхность, 10 — генератор тумана. Также на рисунке 1(a,b) показаны: 3 — линии тока вихревой структуры, 4 — лазерный “нож”, 5 — апертура излучателя, 7 — крупные инерционные частицы, 9 — пелена паров глицерина. Основные габариты установки (Д×Ш×В): 2000×1300×1500 мм; размер измерительной области в фокусе кросскорреляционной камеры 350×350 мм при

разрешении матрицы камеры 2048×2048 пикселей. Подстилающей поверхностью, над которой генерируются нестационарные воздушные вихри, служит лист алюминия диаметром 1100 мм и толщиной 1.5 мм. Для генерации указанных вихрей применяли газовую горелку (на схеме не показана), расположенную под подстилающей поверхностью, температура нагрева центра подстилающей поверхности достигала 610 К. Образование вихрей происходило в результате создания неустойчивой стратификации воздуха. Основные компоненты и характеристики измерительного комплекса “Полис – PIV”:

- двойной импульсный лазер Nd:YAG Quantel Ever Green с энергией в импульсе 145 мДж, длиной волны 532 нм и длительностью импульса 10 нс;
- цифровая кросскорреляционная камера GEV–B2020 MBobcat GEV Imperx с разрешением 2048×2048 пикселей, фиксирующая до 16 пар кадров в секунду;
- оптическая призма импульсного лазера с углом развертки 42° пучка света в плоскость и толщиной полученной плоскости лазерного “ножа” ≈ 1,5 мм;
- синхронизирующее устройство — процессор “ПОЛИС”;
- управляющий компьютер с программным обеспечением “ActualFlow”.

В основе применения PIV-диагностики лежит работа с изображениями. В свою очередь, корректность результатов напрямую зависит от качества полученных изображений [8]. На экспериментальных снимках должны четко наблюдаться отдельные частицы или однородные структуры — скопления частиц; также следует свети к минимуму засветку, затенение, размытие областей кадра и прочие негативные явления, ведущие к частичной утере информативности кадра.

3. ВИЗУАЛИЗАЦИЯ И РЕЖИМНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

При физическом моделировании двухфазных воздушных нестационарных вихрей необходимо качественно визуализировать (или “засеять”) генерируемую вихревую структуру [3]. В данной работе рассматривается рабочий режим, который включает в себя общее задымление рабочей области малоинерционными частицами-трассерами (микрокапли глицерина, $d_p \sim 1\text{--}5$ мкм) как при помощи генератора тумана, так и путем нанесения глицериновой пленки на поверхность подстилающей поверхности перед включением газовой горелки.

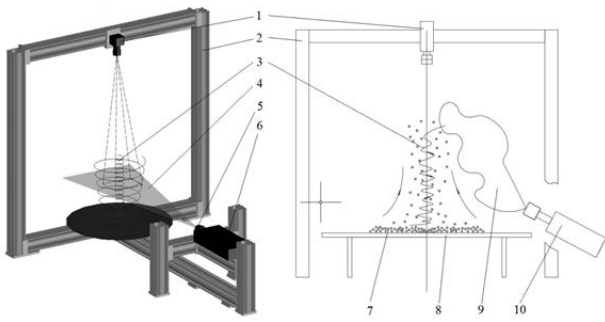


Рисунок 1. Схема эксперимента: (а) — схема экспериментальной установки; (б) — принцип ввода частиц. Цифрами обозначены: 1 — кросскорреляционная камера, 2 — каркас установки, 3 — вихревая структура, 4 — лазерный “нож”, 5 — апертура излучателя, 6 — сдвоенный импульсный лазер, 7 — частицы стекла, 8 — подстилающая поверхность, 9 — пары азеотропной смеси, 10 — генератор тумана.

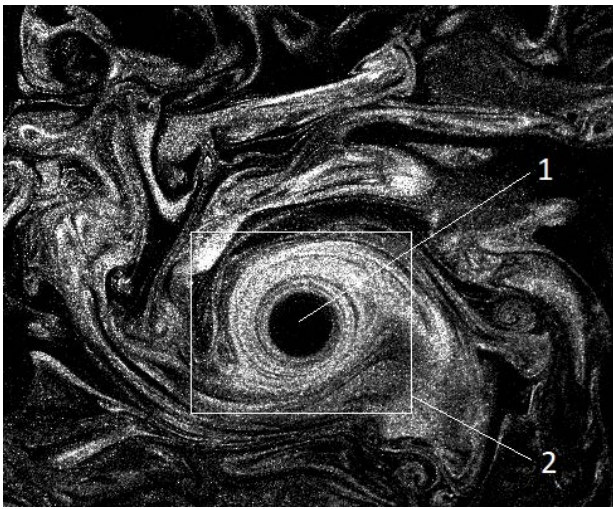


Рисунок 2. Изображение, полученное при поперечной съемке концентрированных вихрей. Цифрами обозначены: 1 — вихревая воронка, 2 — область вихревая трубка.

На рисунке 2 показано характерное моментальное изображение генерируемых двухфазных вихрей. На рисунке 2 хорошо различимы зоны с достаточной концентрацией малоинерционных микрокапель паров в области основной вихревой воронки (поз. 2) для применения алгоритмов нахождения полей скорости.

4. ОЦЕНКА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЦЕНТРА ВИХРЕВОЙ СТРУКТУРЫ

В данном разделе на примере полученных данных разбираются некоторые методические приемы по анализу обработанных экспериментальных данных.

Зачастую время устойчивой генерации вихря порядка $\tau \approx 50$ с; регистрация полей скорости осуществляется с частотой 1 Гц. На рисунке 3 показано характерное векторное поле через 25 секунд после начала генерации, полученное с помощью стандартного встроенного кросскорреляционного алгоритма в ПО PIV “ActualFlow”, с разбиением расчетной области на ячейки 64x64 пиксела. Для всего ансамбля из 50 пар кадров, полученных в течение генерации вихревой структуры, вычислялись

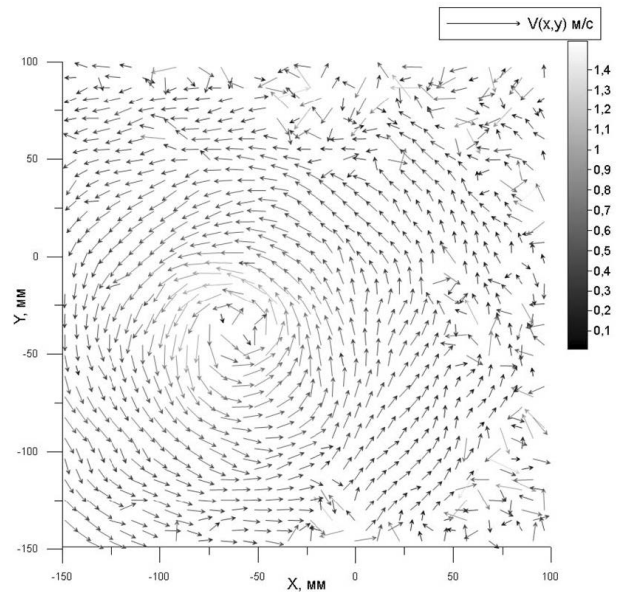


Рисунок 3. Характерное векторное поле вихревой воронки.

векторные карты. На основе полученных данных далее производилась оценка положения вихря в плоскости измерений.

Полезным приемом для анализа векторных полей является нахождение центра воронки вихря. Это позволяет отслеживать положение центра нестационарного вихря в измерительной области для разных моментов его жизни. Один из существующих приемов по нахождению центра нестационарного вихря предложен в [8] и развит в [9]. Суть метода заключается в следующем. Пусть P — фиксированная точка в измерительной области. Далее вводится скалярная функция $\Gamma_1(P)$

$$\Gamma_1(P) = \frac{1}{S} \iint \frac{((PM \wedge U_M) \cdot z)}{(\|PM\| \cdot \|U_M\|)} \cdot dS = \frac{1}{S} \iint \sin(\theta_M) dS \quad (1)$$

где S — плоскость в окрестности фиксированной точки P ; M принадлежит плоскости S и z является единичным вектором к измерительной плоскости; θ_M представляет угол между вектором скорости U_M и радиус-вектором PM . Центр основного крупного вихря $O_{(x,y)}$ определяется при достижении граничного значения $|\Gamma_1|$. В случае осесимметричного вихря $|\Gamma_1| \rightarrow 1$ в окрестности $P \in S$.

При анализе дискретных векторных полей, полученных при помощи оптической диагностики PIV, S трансформируется в прямоугольную область фиксированного размера с центром в точке P . Тогда $\Gamma_1(P)$ определяется как

$$\Gamma_1(P) = \frac{1}{N} \iint \frac{((PM \wedge U_M) \cdot z)}{(\|PM\| \cdot \|U_M\|)} = \frac{1}{N} \sum_S \sin(\theta_M) \quad (2)$$

где N — количество произвольных точек M внутри плоскости S . Параметр N является своего рода фильтром, отсеивающим центры $o_{(x,y)}$ мелкомасштабных вторичных турбулентных структур около воронки основного вихря. На практике центр $O_{(x,y)}$ крупной вих-

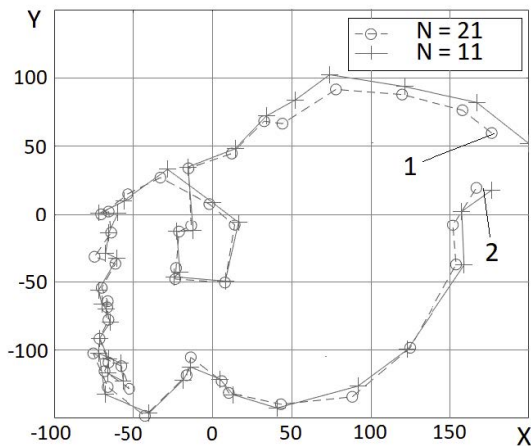


Рисунок 4. Перемещение центра $O(x,y)$ крупной вихревой структуры.

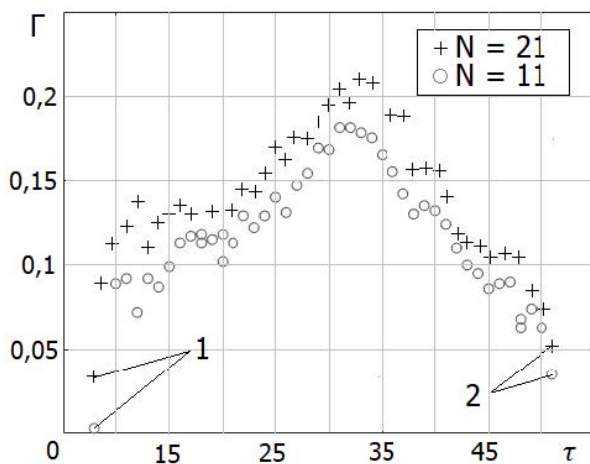


Рисунок 5. Значения циркуляции вихревой структуры во время эксперимента.

ревой структуры в измерительной области идентифицируется, когда $|\Gamma_1|$ превышает порог 0.9.

На рисунке 4 показано перемещение центра $O(x,y)$ крупной вихревой структуры в плоскости измерений. Воронка вихря вращается против часовой стрелки. Здесь цифрой 1 показана точка входа вихревой воронки в измерительную плоскость. Цифрой 2 обозначена точка выхода из измерительной плоскости. Центр определен по методике, указанной выше. Как видно из графика, варьирование количества N опорных точек M приводит к несущественным расхождениям определения положения центра вихря (в особенности в начальный и конечный момент времени при малых значениях циркуляции $\Gamma < 0.1$). Отметим, что полученные координаты центра $O(x,y)$ в результате анализа векторного поля и физические координаты центра вихря могут не совпадать (вследствие зависимости от выбранного разме-

ра расчетной ячейки кросскорреляционного алгоритма обработки изображений). В данной работе влияние размеров ячеек на точность определения центра вихря не рассматривается.

На рисунке 5 показаны значения циркуляции крупной вихревой структуры $\Gamma(\tau)$, определенные по разному количеству опорных векторов. Цифра 1 обозначает точку входа вихревой воронки в измерительную плоскость. Цифра 2 обозначает точку выхода из измерительной плоскости. Стоит отметить, что при снижении характерного расстояния перемещения вихревой структуры (рисунок 4), наблюдается существенный прирост значения циркуляции, в то время как при увеличении расстояния перемещения значение циркуляции падает.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены некоторые экспериментальные приемы по изучению двухфазных нестационарных вихрей при помощи оптической диагностики полей скорости PIV. Показан пример визуализации вихревых воронок малоинерционными частицами-трассерами. Показано характерное векторное поле для одного из режимов визуализации. Продемонстрирован прием по нахождению центра вихря, опираясь на векторные карты, полученные при помощи оптической диагностики полей скорости. Показана траектория перемещения центра крупного вихря по измерительной плоскости. Данный прием может быть полезным при проведении оценок траекторий разлета и прочих динамических характеристик инерционных частиц (осколков) от центра торнадоподобных атмосферных вихрей, по аналогии перемещения вихрей меньшего масштаба, полученных в лабораторных условиях.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 20-19-00551).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вараксин А Ю 2017 *Теплофизика высоких температур* **55** 291–316
2. Вараксин А Ю 2017 *Теплофизика высоких температур* **53** 441–466
3. Varaksin A Y 2015 *Measurement Techniques* **58** 655–660
4. Ashrafi A 2021 *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics* **208** 104449
5. Junayed C 2019 *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics* **188** 61–79
6. Nichol S 2021 *Energies* **14** 61–79
7. Алексеенко СВ 2003 *Введение в теорию концентрированных вихрей* 1-е изд. (Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН)
8. Grosjean N, Graftieaux L, Michard M, Hübner W, Tropea C and Volkert J 1997 *Measurement Science Technology* **8** 1523–1532
9. Graftieaux L, Michard M and Grosjean N 2001 *Measurement Science Technology* **12** 1422–1429