

Визуализация турбулентных следов за крупными частицами

А.А. Мочалов^{1,А,В}, А.Ю. Вараксин^{2,А,В}

^А Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Москва, Россия

^В Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

¹ ORCID: 0000-0003-3078-1277, artem.mochalov@yandex.ru

² ORCID: 0000-0002-8799-6378, varaksin_a@mail.ru

Аннотация

Предпринята попытка визуализации течения, формирующегося в следах за крупными частицами, движущимися в нисходящем турбулентном потоке воздуха в канале. Также в работе рассмотрены возможности по восстановлению полей скорости за крупной частицей по визуальным данным. Приведена схема экспериментальной установки (геометрия рабочего участка, вспомогательное и основное оборудование). Кратко описана система диагностики полей скорости PIV (Particle Image Velocimetry). Предложена методика визуализации многофазного потока «газ – твердые частицы». Приведены исходные изображения крупных частиц (сфер). Приведены результаты экспериментального определения характеристик вихревого следа за задней критической точкой крупной частицы.

Ключевые слова: визуализация, диагностика полей скорости, двухфазные потоки, вихревой след, турбулентность.

1. Введение

Особенности движения дисперсной примеси в виде частиц в турбулентных потоках газа и ее обратное влияние на характеристики турбулентности несущей фазы являются ключевыми проблемами теории двухфазных течений. Обратная задача заключается в изучении влияния частиц на характеристики несущего их газового потока. Решение этой задачи предполагает определение характеристик газа в присутствии частиц: полей скоростей и температур, коэффициентов трения и теплоотдачи и т.д. [1-7]. Пионерскими исследованиями, в которых изучалась диссипация энергии турбулентности относительно малоинерционными частицами и генерация энергии турбулентности крупными частицами в вертикальных и горизонтальных трубах, являются работы [8,9]. Имеется достаточно большое количество экспериментальных исследований, в которых авторы изучали особенности процесса дополнительной диссипации энергии турбулентности вследствие присутствия частиц [10-12]. В то же время, практически отсутствуют эксперименты по установлению влияния крупных частиц на энергию турбулентности несущего газа. Целью настоящей работы является визуализация момента генерации турбулентности за крупной движущейся частицей.

2. Экспериментальная установка для визуализации турбулентных следов

Установка для исследования двухфазных течений с крупными частицами (рис. 1) представляет собой вертикальный канал. На входе в канал установлен генератор тумана **1**, далее идет лемнискатный насадок **2**, к которому при помощи специальных пило-

нов прикреплен узел подачи крупных частиц **3** через который подается дисперсная фаза. Далее, воздушный поток проходит начальный участок круглого сечения **4** (диаметр – 100 мм, длина – 1000 мм, материал – ПВХ) и затем попадает в рабочую секцию **5** (квадратное сечение – сторона 100 мм, длина – 1000 мм, материал органическое стекло). Выходной участок рабочего канала представляет из себя заглушку для улавливания дисперсной фазы. Воздушный поток покидает канал при помощи регулируемого вентилятора в составе фильтра циклонного типа **7**. Лемнискатный насадок **2**, узел подачи крупных частиц **3** и фильтр циклонного типа **7** изготовлены при помощи аддитивных технологий (FDM) из полилактида (PLA).

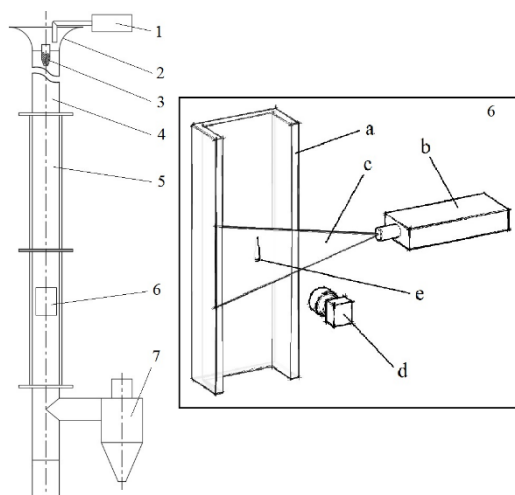


Рис. 1 Схема экспериментальной установки: 1 – генератор тумана; 2 – лемнискатный насадок; 3 – узел подачи крупных частиц; 4 – круглая труба, начальный участок; 5 – канал квадратного сечения; 6 – измерительная область и средства диагностики; 6 (a) – измерительный участок квадратного сечения; 6 (b) – сдвоенный импульсный лазер; 6 (c) – плоскость лазерного «ножа»; 6 (d) – кросскорреляционная камера; 6 (e) – движущаяся крупная частица; 7 – циклон с регулируемым вентилятором.

В качестве дисперсной фазы в эксперименте применяются крупные сферические частицы (рис. 2) (материал – пластик, физическая плотность частиц – 1050 кг/м³) со средним диаметром 6 мм. Поверхность частиц зачерненная, с целью снижения эффекта отражения света и засветки приемной оптики.



Рис. 2 Сферические частицы

Также в качестве дисперсной фазы, с целью визуализации воздушного потока, в поток вводились микро- капли (вещество – глицерин, физическая плотность – 1260 кг/м³) при помощи генератора тумана (модель Safex F2010) диаметром от 1 до 5 мкм (рис. 3).

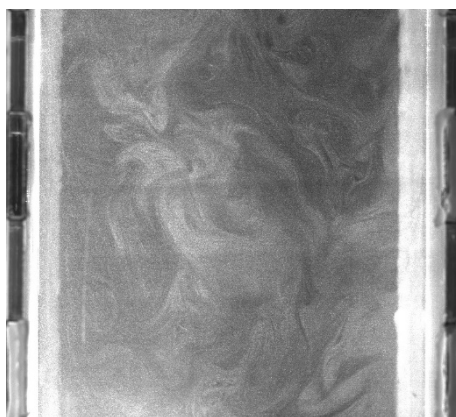


Рис.3 Микрокапли глицерина

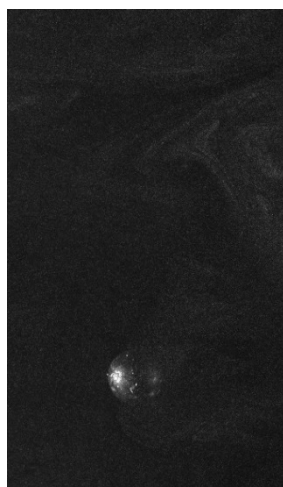
Фотосъемка турбулентных следов за крупными движущимися частицами осуществлялась при помощи комплекса анемометрии по изображениям частиц «PIV» (Particle Image Velocimetry). В состав измерительного комплекса входят: кросскорреляционная камера **6 (d)**, (модель Flow Sense EO 2M) с разрешением 1600 x 1200 пикселей и установленным объективом (модель Zeiss 50 мм f/1.4 ZF.2) и сдвоенный импульсный лазер **6 (b)** (модель Dual Power 145 – 15) с энергией 145 мДж и длиной волны 532 нм.

3. Визуализация турбулентных следов за крупными частицами

Визуализация турбулентных следов за крупными движущимися частицами осуществлялась следующим образом. Из узла подачи крупных частиц пластиковые сферы попадают в начальный участок круглого сечения, затем попадают в прозрачную измерительную секцию квадратного сечения где разгоняются до скорости $V_p = 5,2$ м/с. В то же время, микро- капли глицерина в виде тумана через лемнискатный насадок попадают в рабочий канал и принимают скорость несущего газа которая на оси канала составляет порядка $V = 1,8$ м/с. Когда пластиковая сфера достигает измерительной области, происходит ее подсветка плоским лазерным «ножом» и последующая фото фиксация. На рисунке 4 показаны характерные изображения попавших в кадр движущихся крупных частиц, окруженных микрокаплями глицерина. Стоит отметить, что удачно сфотографированных частиц не так много, на рис. 4(а) и рис. 4(б) показаны частицы, не попавшие в плоскость лазерного «ножа» и в фокус камеры. В то время как, на рис. 4(в) показан случай удачно сфотографированной частицы, в кадре хорошо просматривается тень от лазерного «ножа».



(а)



(б)



(в)

Рис. 4 Характерные изображения движущихся крупных частиц, размер кадра 25x40 мм: (а) – частица за плоскостью лазерного «ножа»; (б) – частица перед плоскостью лазерного «ножа»; (в) – частица в плоскости лазерного «ножа»

4. Характеристики турбулентного следа за крупной частицей

Применение в эксперименте оптического метода диагностики полей скорости «PIV» позволяет определить основные характеристики вихревого следа за крупной частицей. При проведении экспериментов система диагностики управлялась с компьютера посредством программного пакета «Dynamic Studio». Диагностика проводилась с частотой 10 Гц. Толщина лазерного «ножа», сформированного цилиндрической линзой, составила порядка 1,5 мм в измерительной области. Измерительная область совпадала с центральным сечением рабочего канала. Размер измерительной области составил порядка 100 x 100 мм. Для расчета мгновенного поля скорости применялся адаптивный PIV алгоритм. Для нахождения характеристик течения в следе за частицей определено предельное пространственное разрешение векторной карты с размером расчетных областей в 16 x 16 пикселей, что соответствует физическому размеру 0,5 x 0,5 мм². Пороговое значение сигнал/шум составило 6,5. Пороговое значение высоты корреляционного пика составило 0,45. Граница определения частицы на фоне «шума» составила 5. Номинальное количество частиц в каждой из расчетных областей составил 10.

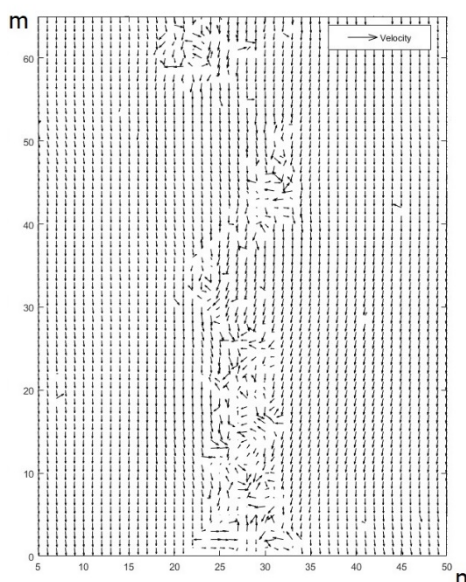


Рис. 5 Векторная карта вихревого следа за крупной частицей

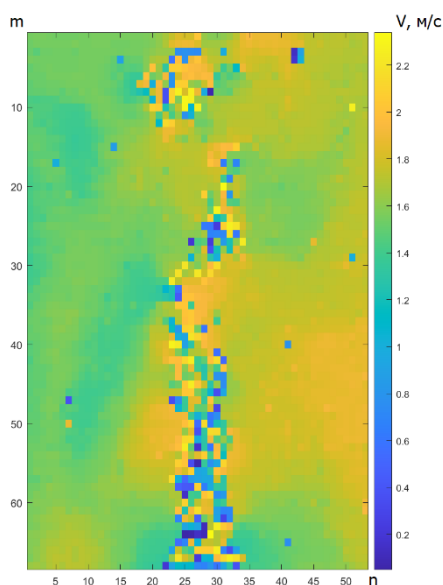


Рис. 6 «Тепловая карта» вихревого следа за крупной частицей

На рисунке 5 приведена векторная карта вихревого следа за крупной частицей. Векторная карта имеет размер $m \times n$ векторов, приблизительно 3000 векторов. На рисунке 6 показана «тепловая карта» вихревого следа за крупной частицей. В отличие от рисунка 5, на рисунке 6 приведена карта скалярных величин. Из приведенных данных можно видеть две характерных области вихревого следа за крупной частицей – область присоединенных вихревых структур и область отсоединенного вихря. Первая из упомянутых областей имеет протяженность (в продольном направлении) примерно 5 диаметров частицы. Вторая характерная область имеет диаметр, приблизительно равный диаметру частицы.

5. Заключение

Авторами показана возможность визуализации и измерения характеристик течения в следе за крупными движущимися частицами в нисходящем воздушном потоке при помощи генератора тумана и системы диагностики полей скорости PIV. Получены распределения скорости в области задней критической точки частицы. Дальнейшая визуальная интерпретация полей скорости показала наличие как области присоединенных вихрей, так и присутствие в потоке отсоединенных крупных вихрей в следе за частицей. Предложенная методика визуализации может быть полезна при изучении вклада крупных частиц в характеристики турбулентных и вихревых многофазных потоков [13-15].

Благодарности

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00734.

Список литературы

1. Вараксин А.Ю. Столкновения в потоках газа с твердыми частицами. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 312 с.
2. Hetsroni G., Sokolov M. Distribution of Mass, Velocity and Intensity of Turbulence in a Two – Phase Turbulent Jet. Trans. ASME. J. Appl. Mech. 1971. V. 38. № 2. P. 315.
3. Laats M.K., Frishman F.M. The Development of the Methodics and Investigation of Turbulence Intensity at the Axis of Two – Phase Turbulent Jet. Fluid Dynam. 1973. V. 8. P. 153.
4. Shuen J.S., Solomon A.S., Zhang Q.F., Faeth G.M. Structure of Particle – Laden Jet: Measurements and Predictions. AIAA J. 1985. V. 23. № 3. P. 396.
5. Tsuji Y., Morikawa Y., Tanaka T., Kazimine T., Nishida S. Measurements of an Axisymmetric Jet Laden with Coarse Particles. Int. J. Multiphase Flow. 1988. V. 14. P. 565.
6. Longmire E.K., Eaton J.K. Structure of a Particle – Laden Round Jet. J. Fluid Mech. 1992. V. 236. P. 217.
7. Fleckhaus D., Hishida K., Maeda M. Effect of Laden Solid Particles on the Turbulent Flow Structure of a Round Free Jet. Exp. Fluids. 1987. V. 5. № 5. P. 323.
8. Tsuji Y., Morikawa Y., Shiomi H. LDV Measurements of an Air-Solid Two-Phase Flow in a Vertical Pipe. J. Fluid Mech. 1984. V. 139. P. 417.
9. Tsuji Y., Morikawa Y. LDV Measurements of an Air – Solid Two – Phase Flow in a Horizontal Pipe. J. Fluid Mech. 1982. V. 120. P. 385.
10. Gore R.A., Crowe C.A. Effect of Particle Size on Modulating Turbulent Intensity. Int. J. Multiphase Flow. 1989. V. 15. №2. P. 279.
11. Rogers C.B., Eaton J.K. The Behavior of Small Particles in a Vertical Turbulent Boundary Layer in Air. Int. J. Multiphase Flow. 1990. V. 16. № 5. P. 819.
12. Kulick J.D., Fessler J.R., Eaton J.K. Particle Response and Turbulence Modification in Fully Developed Channel Flow. J. Fluid Mech. 1994. V. 277. P. 109.

13. Вараксин А.Ю., Деньщиков К.К., Протасов М.В., Ромаш М.Э. Визуализация смерчеобразных структур с целью совершенствования систем охлаждения электротехнических устройств. Научная визуализация. 2020. Т. 12. № 2. С. 74–83.
14. Желебовский А.А., Мочалов А.А., Вараксин А.Ю. Восстановление полей концентрации частиц при визуализации обтекания тел двухфазными потоками. Научная визуализация. 2021. Т. 13. № 3. С. 1–8.
15. Мочалов А.А., Вараксин А.Ю. Обработка визуальных экспериментальных PIV-данных при помощи генератора случайных синтетических частиц. Научная визуализация. 2021. Т. 13. № 5. С. 27–34.

Visualization of Turbulent Wakes Behind Large Particles

A.A. Mochalov^{1,A,B}, A.Yu. Varaksin^{2,A,B}

^A Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

^B Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

¹ ORCID: 0000-0003-3078-1277, artem.mochalov@yandex.ru

² ORCID: 0000-0002-8799-6378, varaksin_a@mail.ru

Abstract

An attempt was made to visualize the flow formed in the wake of large particles moving in a downward turbulent airflow in the channel. The paper also considers the possibilities of reconstructing velocity fields behind a large particle from visual data. A diagram of the experimental setup is shown (geometry of the working area, auxiliary and main equipment). The PIV (Particle Image Velocimetry) system is briefly described. A technique for visualizing multiphase flow “gas – solid particles” is proposed. The original images of large particles (spheres) are shown. The results of the experimental determination of the characteristics of the wake vortex behind the rear critical point of a large particle are presented.

Keywords: visualization, particle image velocimetry, two – phase flows, turbulent wake, turbulence.

References

1. Varaksin A.Yu. Collisions in Particle-Laden Gas Flows. New York: Begell House, 2013.
2. Hetsroni G., Sokolov M. Distribution of Mass, Velocity and Intensity of Turbulence in a Two – Phase Turbulent Jet. Trans. ASME. J. Appl. Mech. 1971. V. 38. № 2. P. 315.
3. Laats M.K., Frishman F.M. The Development of the Methodics and Investigation of Turbulence Intensity at the Axis of Two – Phase Turbulent Jet. Fluid Dynam. 1973. V. 8. P. 153.
4. Shuen J.S., Solomon A.S., Zhang Q.F., Faeth G.M. Structure of Particle – Laden Jet: Measurements and Predictions. AIAA J. 1985. V. 23. № 3. P. 396.
5. Tsuji Y., Morikawa Y., Tanaka T., Kazimine T., Nishida S. Measurements of an Axisymmetric Jet Laden with Coarse Particles. Int. J. Multiphase Flow. 1988. V. 14. P. 565.
6. Longmire E.K., Eaton J.K. Structure of a Particle – Laden Round Jet. J. Fluid Mech. 1992. V. 236. P. 217.
7. Fleckhaus D., Hishida K., Maeda M. Effect of Laden Solid Particles on the Turbulent Flow Structure of a Round Free Jet. Exp. Fluids. 1987. V. 5. № 5. P. 323.
8. Tsuji Y., Morikawa Y., Shiomi H. LDV Measurements of an Air-Solid Two-Phase Flow in a Vertical Pipe. J. Fluid Mech. 1984. V. 139. P. 417.
9. Tsuji Y., Morikawa Y. LDV Measurements of an Air – Solid Two – Phase Flow in a Horizontal Pipe. J. Fluid Mech. 1982. V. 120. P. 385.
10. Gore R.A., Crowe C.A. Effect of Particle Size on Modulating Turbulent Intensity. Int. J. Multiphase Flow. 1989. V. 15. №2. P. 279.
11. Rogers C.B., Eaton J.K. The Behavior of Small Particles in a Vertical Turbulent Boundary Layer in Air. Int. J. Multiphase Flow. 1990. V. 16. № 5. P. 819.
12. Kulick J.D., Fessler J.R., Eaton J.K. Particle Response and Turbulence Modification in Fully Developed Channel Flow. J. Fluid Mech. 1994. V. 277. P. 109.
13. Varaksin A.Yu., Denshchikov K.K., Protasov M.V., Romash M.E. Visualization of Whirlwind (non-stationary vortex) Structures Aimed to the Improvement of Cooling Systems of Electric Power Devices. Scientific Visualization. 2020. V. 12. N. 2. P. 74–83.

14. Zhelebovskiy A.A., Mochalov A.A., Varaksin A.Yu. Recovery of Particle Concentration Fields by Two-phase Flow Visualization Around Bodies. Scientific Visualization. 2021. V. 13. N. 3. P. 1–8.
15. Mochalov A.A., Varaksin A.Yu. Processing of Visual Experimental PIV-data Using a Random Synthetic Particle Generator. Scientific Visualization. 2021. V. 13. N. 5. P. 27–34.