

Анализ параметров частиц-трассеров для оптической диагностики вихревых потоков

А. Ю. ВАРАКСИН^{1, 2}, М. В. ПРОТАСОВ¹, Д. В. МАРИНИЧЕВ¹,
Н. В. ВАСИЛЬЕВ²

¹ Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия,
e-mail: varaksin_a@mail.ru

² Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва,
Россия, e-mail: nikvikvas@mail.ru

Рассмотрен выбор параметров инерционности (плотности, размера) частиц-трассеров для визуализации и оптической диагностики вихревых течений. Получено выражение для нахождения времени динамической релаксации указанных частиц, отслеживающих движение газа в вихрях различной интенсивности. Приведен пример выбора характеристик частиц для визуализации воронки и каскада воздушного лабораторного вихря.

Ключевые слова: вихревые потоки, оптическая диагностика, частица-трассер.

The problem of selection of parameters of inertance (density, size) of flare particles required for visualization and optical diagnostics of vortex flows has been considered. An expression for dynamic relaxation time determination for flare particles tracing the gas motion in vortices of different intensity was received. An example of particle parameters selection for visualization of laboratory-simulated air vortex funnel is described.

Key words: vortex flows, optical diagnostic, flare particle.

Вихревое движение является одной из распространенных форм движения сплошных сред [1]. Вихревые (закрученные) течения распространены не только в природе (вихревые бури, смерчи) [2—4], но и во многих технических устройствах (газотурбинных двигателях, циклонных сепараторах, вихревых топочных камерах и горелках, центробежных форсунках, вихревых трубах, различных турбулизаторах) [5, 6]. Образование вихрей в зонах отрыва потока — как правило, негативный фактор, способствующий снижению аэродинамического качества летательных аппаратов, образованию нежелательных отложений на жаровых трубах камер сгорания, теплообменных поверхностях регенераторов и др.

Важную роль в изучении условий образования и динамики вихревых структур играют методы физического моделирования. В последние годы широкое распространение получили бесконтактные оптические методы диагностики, такие как лазерная доплеровская анемометрия (LDA), анемометрия по изображениям частиц (PIV) и их многочисленные модификации [7, 8]. Для измерений кинематических характеристик сплошной среды в нее вводят частицы-трассеры (обычно суб- и микрометровых размеров), массовая и объемная концентрация которых ничтожна. При соблюдении определенных условий мгновенные скорости частиц-трассеров будут практически равны скоростям несущей их сплошной среды, например воздуха или воды.

Отметим, что двухфазные потоки, в которых дисперсные включения (частицы, капли, пузыри) присутствуют естественным образом, также исследуют с использованием указанных выше методов диагностики [9, 10]. Динамическое проскальзывание (разница скоростей несущей и дисперсной фаз) может изменяться в очень широком диапазоне — практически от нулевых значений до нескольких километров в секунду в зависимости от параметров режима: скорости

сплошной среды, геометрии потока и инерционности дисперсной фазы.

Выбор оптимальных параметров частиц-трассеров является непростой задачей. С одной стороны, они должны быть достаточно крупными, чтобы отражать излучение с интенсивностью, необходимой для его регистрации цифровой камерой, а с другой, обладать малой инерционностью, чтобы без проскальзывания следовать линиям тока исследуемого течения. Несоответствие скорости частиц-трассеров и движущейся среды — одна из важнейших составляющих погрешности оптических методов измерения скорости исследуемого потока.

При экспериментальном изучении однофазных свободных (неограниченных стенками) нестационарных вихрей [11—15], характеризующих спонтанностью образования и пространственно-временной нестабильностью, выбор размера и плотности частиц-трассеров приобретает особую актуальность из-за центробежной силы инерции, действующей на частицы в одном направлении (от центра вращения).

Цель данной работы — предложить методику оценки инерционности частиц-трассеров, используемых для визуализации и оптической диагностики вихревых потоков.

Анализ движения частиц во вращающемся газе. Для выяснения некоторых особенностей поведения частиц в свободных вихрях выполним расчет их движения во вращающемся газе. Уравнение Лагранжа движения частицы в векторной форме имеет вид

$$m_p \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \sum_i \mathbf{F}_i, \quad (1)$$

где m_p , $\mathbf{v}$ — масса и вектор скорости частицы; t — время; $\mathbf{F}_i$ — i -я сила, действующая на частицу.

В полярной системе координат проекции (1) в тангенциальном (азимутальном) и радиальном направлениях запишем как

$$m_p \frac{dv_\phi}{dt} = \sum_i F_{i\phi}; \quad (2)$$

$$m_p \frac{dv_r}{dt} = \sum_i F_{ir}, \quad (3)$$

где v_ϕ , v_r — тангенциальная и радиальная составляющие вектора скорости частицы; $F_{i\phi}$, F_{ir} — тангенциальные и радиальные проекции i -х сил, действующих на частицу.

Рассмотрим движение частиц в газе, вращающемся по закону твердого тела $\Omega = u_\phi/r = \text{const}$, т. е. с постоянной угловой скоростью. Здесь u_ϕ — тангенциальная скорость газа; r — расстояние от оси вращения (радиус вихря). Примем допущение, что эффект проскальзывания частиц относительно газа в тангенциальном направлении отсутствует, $u_\phi = v_\phi$. Это упрощает последующие выкладки, так как решения уравнения (2) не требуется.

Для дальнейшего анализа используем уравнение (3), описывающее динамику частиц в радиальном направлении. На частицу, движущуюся по криволинейной траектории, действует центробежная сила F_ϕ , отбрасывающая ее от оси вращения (рис. 1):

$$F_\phi = m_p v_\phi^2 / r. \quad (4)$$

Частица под действием центробежной силы стремится перемещаться в радиальном направлении, вследствие чего возникает сила F_r аэродинамического сопротивления со стороны газа (рис. 1), препятствующая ее движению:

$$F_r = 0,125\pi d_p^2 C_D \rho (u_r - v_r) |u_r - v_r|, \quad (5)$$

где C_D — коэффициент аэродинамического сопротивления частицы; ρ — плотность газа; u_r — радиальная скорость газа; d_p — диаметр частицы.

Для стоксовой частицы число Рейнольдса $Re_p < 1$ и коэффициент аэродинамического сопротивления имеют вид

$$C_D = 24/Re_p; Re_p = |u_r - v_r| d_p / \nu, \quad (6)$$

где ν — кинематическая вязкость газа.

Подставив (6) в (5) с учетом $u_r = 0$, получим

$$F_r = -3\pi\mu v_r d_p, \quad (7)$$

где μ — динамическая вязкость газа.

Дальнейшие выкладки выполним при условии, что частица движется в радиальном направлении с постоянной скоростью $dv_r/dt = 0$. Тогда из (3) с учетом (4), (7) имеем

$$m_p v_\phi^2 / r = 3\pi\mu v_r d_p. \quad (8)$$

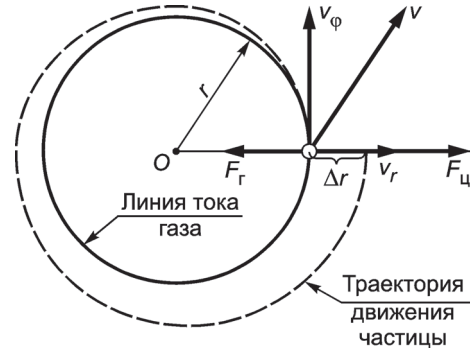


Рис. 1. Схема сил, действующих на частицу, и траектория ее движения

С учетом, что $m_p = \rho_p \pi d_p^3 / 6$, из (8) найдем

$$v_r = v_\phi^2 \rho_p d_p^2 / 18\mu r = v_\phi^2 \tau_{p0} / r, \quad (9)$$

где ρ_p — плотность материала частицы; $\tau_{p0} = \rho_p d_p^2 / (18\mu)$ — время динамической релаксации стоксовой частицы.

Перемещение частиц-трассеров в радиальном направлении приводит к тому, что они не следуют линиям тока вихревого течения. Количественной мерой их отклонения от линий тока газа может служить угол поворота вектора скорости частицы вследствие появления радиальной составляющей скорости (см. рис. 1). Тангенс угла (отношение радиальной и азимутальной скоростей) получим из (9):

$$\tan \alpha = v_r / v_\phi = v_\phi \tau_{p0} / r. \quad (10)$$

При известной v_r вычислим относительное смещение частицы в радиальном направлении за один оборот, происходящий за время $\Delta t = 2\pi r / v_\phi$, с использованием (9):

$$\Delta r / (2\pi r) = v_r \Delta t / (2\pi r) = v_r / v_\phi = \tan \alpha. \quad (11)$$

Помимо выражений (10), (11) в физике двухфазных потоков для установления относительной инерционности частиц используют также безразмерный параметр — число Стокса

$$Stk_f = \tau_p / T_f, \quad (12)$$

где τ_p — время динамической релаксации частицы; T_f — характерное время несущей фазы.

Число Стокса определяет быстроту отклика частиц на изменения скорости газа. В случае, когда τ_p мало по сравнению с характерным временем вихревой структуры, $Stk_f \ll 1$ и частицы практически мгновенно достигают скорости газа.

Характерное время вихревого течения представим как

$$T_f = r / u_\phi. \quad (13)$$

С учетом (13) выражение (12) приобретет вид

$$Stk_f = u_\phi \tau_p / r. \quad (14)$$

Сравнив (14) и (10) с учетом принятого ранее допущения $u_\phi = v_\phi$ для рассматриваемого случая стоксовых частиц $\tau_p = \tau_{p0}$, несложно получить, что $Stk_f = \tan \alpha$.

Примем $Stk_f = 0,01$ в качестве некоторого граничного значения числа Стокса, при котором скорость частицы-трассера практически равна скорости несущего газа (погрешность не будет превышать $10^{-4} \%$). В этом случае можно провести оценки инерционности (времени динамической релаксации) частиц-трассеров, при использовании которых погрешность измерения скоростей будет минимальной. Выполним такие оценки с использованием (14). Полученное максимальное время динамической релаксации частиц-трассеров τ_{p0} , необходимое для оптической диагностики вихревых потоков различной интенсивности, определяемой их размерами $r = var$ и характерными скоростями $u_\phi = var$, приведено в таблице.

Максимальное время динамической релаксации частиц-трассеров, необходимое для оптической диагностики вихревых потоков различной интенсивности

u_ϕ , м/с	τ_{p0} , мс, при r , м				
	0,05	0,1	0,2	0,5	1,0
0,5	1,0	2,0	4,0	10,0	20
1	0,5	1,0	2,0	5,0	10
5	0,1	0,2	0,4	1,0	2
10	0,05	0,1	0,2	0,5	1

Из таблицы следует, что для диагностики вихревого течения с параметрами $r = 0,1$ м, $u_\phi = 0,5$ м/с в качестве частиц-трассеров должны использоваться частицы, время релаксации которых не превышает 2 мс. Такое время имеют частицы стекла плотностью $\rho_p = 2550$ кг/м³ и диаметром $d_p \leq 16$ мкм. Увеличение характерной скорости вихря (при его одинаковом размере) приводит к линейному уменьшению времени динамической релаксации частиц-трассеров. Например, для диагностики вихревого течения с параметрами $r = 0,1$ м, $u_\phi = 5$ м/с время релаксации частиц-трассеров не должно превышать 0,2 мс. Этому условию удовлетворяют частицы стекла с $d_p \leq 5$ мкм.

Пример. Рассмотрим, как выбрать характеристики твердых частиц для экспериментального изучения свободных концентрированных воздушных вихрей, подобных вихревым структурам в земной атмосфере (пыльные бури, смерчи).

Отметим, что при физическом моделировании воздушных смерчей необходимо визуализировать как воронку, так и каскад лабораторных вихрей-аналогов. Каскад — это образующийся столб пыли или облако из водяных брызг, которые из-за большой инерции под действием центробежных

сил выбрасываются за пределы воронки в область практически покоящегося воздуха. В дальнейшем эти частицы опускаются вниз под действием силы тяжести. Очевидно, что частицы-трассеры, визуализирующие воронку вихря и почти полностью отслеживающие движение несущего газа, и частицы, составляющие его каскад, должны иметь разные инерционности.

Генерацию вихревых структур в лабораторных условиях осуществляли созданием неустойчивой стратификации воздуха над подстилающей поверхностью алюминиевого листа диаметром 1100 мм и толщиной 1,5 мм, нагреваемого снизу газовой горелкой (максимальная тепловая мощность 3,5 кВт). Схема используемой экспериментальной установки и режимы нагрева подробно описаны в [12, 13]. Для визуализации образуемых вихревых структур применяли частицы магнезии $4MgCO_2Mg(OH)_2 \cdot 4H_2O$ плотностью 3900 кг/м³, которые наносили тонким слоем на подстилающую поверхность перед проведением экспериментов. Видеосъемку генерируемых вихрей выполняли цифровой видеокамерой Sanyo VCC-6572P (Япония).

На рис. 2 приведена фотография частиц магнезии. Анализ распределения частиц по размерам показывает, что их средний диаметр составляет $d_{p1} = 6$ мкм, также имеются крупные конгломераты частиц с $d_{p2} = 50$ мкм и более. До экспериментов были выполнены оценки инерционности частиц магнезии с использованием формулы (14) для характерной скорости $u_\phi = 1$ м/с и радиуса воронки лабораторных вихрей $r = 0,05$ м. Получили $Stk_{f1} = 0,0087$, $Stk_{f2} = 0,6$ соответственно для малоинерционных (d_{p1}) и крупных (d_{p2}) частиц. Из этих оценок следует, что малоинерционные частицы будут практически мгновенно подстраиваться под скорость воздуха в вихре, тогда как крупные частицы должны выбрасываться из вихря. Многочисленные эксперименты подтвердили работоспособность выполненных оценок: воронка и каскад лабораторных вихрей эффективно визуализировались с помощью малоинерционных и крупных частиц, соответственно.

Выводы. Решена задача выбора инерционности частиц-трассеров, используемых для визуализации и диагностики вихревых потоков. Оценено максимальное время их динамической релаксации. При использовании частиц-трассеров погрешности измерений скоростей вихревых структур будут минимальны. Приведен пример выбора инерционности частиц для визуализации воронки и каскада свободного воздушного лабораторного вихря.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 14-19-00453).

Литература

1. Алексеев С. В., Куйбин П. А., Окулов В. Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. Москва—Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2005.
2. Наливкин Д. В. Ураганы, бури и смерчи. Географические особенности и геологическая деятельность. Л.: Наука, 1969.
3. Скорер Р. Аэрогидродинамика окружающей среды. М.: Мир, 1980.
4. Вараксин А. Ю., Ромаш М. Э., Копейцев В. Н. Торнадо. М.: Физматлит, 2011.
5. Пиралишвили Ш. А., Поляев В. М., Сергеев М. Н. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения. М.: УНПЦ «Энергомаш», 2000.

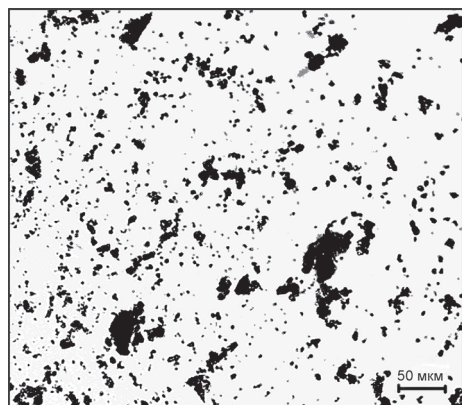


Рис. 2. Фотография частиц магнезии

6. Иноземцев А. А., Нихамкин М. А., Сандрацкий В. Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. Т. 2. М.: Машиностроение, 2008.

7. Alekseenko S. V., Bilsky A. V., Dulin V. M., Markovich D. M. Experimental study of an impinging jet with different swirl rates // Int. J. Heat Fluid Flow. 2007. V. 28. P. 1340—1359.

8. Alekseenko S. V., Antipin V. A., Bobylev A. V., Markovich D. M. Application of PIV to velocity measurements in a liquid film flowing down an inclined cylinder // Exp. Fluids. 2007. V. 43. N. 2—3. P. 197—207.

9. Вараксин А. Ю., Полежаев Ю. В., Поляков А. Ф. Экспериментальное исследование влияния твердых частиц на турбулентное течение воздуха в трубе // Теплофизика высоких температур. 1998. Т. 36. № 5. С. 767—775.

10. Hout van R. Time-resolved PIV measurements of the interaction of polystyrene beads with near-wall-coherent structures in a turbulent channel flow // Int. J. Multiphase Flow. 2011. V. 37. P. 346—357.

11. Вараксин А. Ю., Ромаш М. Э., Копейцев В. Н. К вопросу управления поведением воздушных смерчей // Теплофизика высоких температур. 2009. Т. 47. № 6. С. 870—876.

12. Вараксин А. Ю., Ромаш М. Э., Копейцев В. Н., Таекин С. И. Параметры неустойчивой стратификации воздуха, приводящей к генерации свободных вихрей // Теплофизика высоких температур. 2010. Т. 48. № 2. С. 269—273.

13. Вараксин А. Ю., Ромаш М. Э., Копейцев В. Н. О возможностях визуализации при моделировании воздушных смерчей // Теплофизика высоких температур. 2010. Т. 48. № 4. С. 617—622.

14. Varaksin A. Y., Romash M. E., Kopeitsev V. N., Gorbachev M. A. Experimental study of wall-free non-stationary vortices generation due to air unstable stratification // Int. J. Heat Mass Transfer. 2012. V. 55. P. 6567—6572.

15. Varaksin A. Y., Romash M. E., Kopeitsev V. N. Effect of net structures on wall-free non-stationary air heat vortices // Int. J. Heat Mass Transfer. 2013. V. 64. P. 817—828.

Дата принятия 16.01.2015 г.

51-74:681.5.08

Применение пьезоструктур для создания струнного измерительного преобразователя на основе автоколебательной системы

Е. В. КУЧУМОВ¹, И. Н. БАРИНОВ¹, В. С. ВОЛКОВ¹, С. А. ГУРИН¹,
С. П. ЕВДОКИМОВ²

¹ Научно-исследовательский институт физических измерений, Пенза, Россия, e-mail: evgenii_kuchumov@mail.ru

² Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

Описан принцип действия микроэлектромеханической автоколебательной системы на основе струнного чувствительного элемента с применением монокристаллического кремния и пьезокерамических пленок. Приведены результаты предварительного (качественного) моделирования такой системы, описаны ее особенности.

Ключевые слова: автоколебания, пьезоматериалы, струнный преобразователь, моделирование, динамика колебаний.

The principle of operation of microelectromechanical self-maintained system based on a string sensitive element with use of a single-crystal silicon and piezoelectric films is described. The results of preliminary (qualitative) modeling of self-oscillatory system are presented and its certain features are described.

Key words: autooscillations, piezomaterials, string converter, modeling, oscillation dynamics.

В настоящее время структуры на основе пьезоматериалов находят применение в различных областях, связанных с мониторингом и контролем колебательных или периодических движений различных конструкций [1, 2]. Такие структуры можно использовать не только для виброгашения или управления заданными режимами деформаций. Применение пьезоматериалов актуально при создании новых чувствительных элементов (ЧЭ) датчиков физических величин на основе монокристаллического кремния, карбида кремния и т. д. В статье представлен предварительный анализ струнного (частотного) ЧЭ из кристаллического кремния, имеющего пьезоструктуру на основе пленок из цирконат-титанат

свинца (ЦТС) $\text{PbZr}_{0,48}\text{Ti}_{0,52}\text{O}_3$ и работающего в режиме автогенератора.

Основное преимущество электромеханических систем колебаний — более высокая добротность (до 10^4 и выше) по сравнению с электрическими колебательными системами, где она достигает лишь нескольких сотен [3]. В то же время точность измерений электромеханического преобразователя существенно выше, чем у механического или даже электрического.

Обоснование подхода. Большинство струнных преобразователей изготавливают из проводящего материала, например магнитного, что связано со способом возбуждения ко-