

Восстановление полей концентрации частиц при визуализации обтекания тел двухфазными потоками

А.А. Желебовский^{1,А}, А.А. Мочалов^{2,А,В}, А.Ю. Вараксин^{3,А,В}

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

^В Объединенный институт высоких температур РАН, Россия

¹ ORCID: 0000-0003-2360-6665, zhelebovsk@gmail.com

² ORCID: 0000-0003-3078-1277, artem.mochalov@yandex.ru

³ ORCID: 0000-0002-8799-6378, varaksin_a@mail.ru

Аннотация

Измерение полей концентрации частиц является одной из основных задач изучения обтекания тел двухфазными потоками «газ – твердые частицы». В работе рассмотрены возможности восстановления полей концентрации частиц по идентификации их изображений. Приведена схема экспериментальной установки для изучения структуры нисходящих потоков газа с частицами. Указаны основные параметры экспериментального стенда (геометрия рабочего участка, скорость воздушного потока, расход воздуха, массовый расход частиц). Кратко описан оптический монохромный комплекс регистрации быстропротекающих процессов. Предложена методика обработки экспериментальных снимков, основанная на алгоритме Дж. Кэнни (J. F. Canny). Алгоритм обработки экспериментальных снимков отрабатывался на стеклянных микросферах, использовавшихся в качестве дисперсной фазы. Приведены исходное изображение микросфер и гистограмма их распределения по размерам. Рассмотрены примеры изображений отдельных микросфер в потоке с целью валидации данных. Приведены результаты экспериментального определения поля концентрации микросфер в нисходящем потоке и в окрестности критической точки обтекаемого тела.

Ключевые слова: визуализация, высокоскоростная съемка, двухфазные потоки, поля концентрации, распознавание частиц.

1. Введение

Проблема взаимодействия двухфазных (дисперсных) потоков с обтекаемыми телами возникла в связи с изучением движения различных летательных аппаратов (ЛА) в запыленной (или дождевой) атмосфере [1–3], а также движения двухфазных теплоносителей в трактах энергетических установок [4–6]. Присутствие твердых частиц (или капель) в потоке может приводить к значительному (порой многократному) увеличению тепловых потоков, а также к эрозионному износу обтекаемой поверхности. Указанные явления обусловлены совместным действием ряда причин: изменением характеристик набегающего потока [7] и параметров развивающегося на теле пограничного слоя [8], возникновением вихревых зон и турбулентных следов, соударениями частиц (или капель) с поверхностью тела [9, 10], изменением шероховатости поверхности и т. п. Интенсивность процессов, сопутствующих обтеканию тел двухфазными потоками, зависит от инерционности и концентрации частиц (капель).

К основным задачам изучения обтекания тел двухфазными (дисперсными) потоками относятся: 1) исследование движения частиц и определение их характеристик (полей скоростей, концентрации и т.д.); 2) установление влияния

частиц на течение газа; 3) исследование процессов взаимодействия частиц с обтекаемой поверхностью [11], включая эрозионное изнашивание, газодинамическое напыление [12–14], обледенение [15–18], свечение [19, 20] и т. п.

Одной из задач экспериментального исследования двухфазных потоков является определение полей концентрации частиц, как в канале, так и вблизи обтекаемых тел. Часто при постановке эксперимента возникает проблема обеспечения равномерного пространственного распределения частиц на входе в рассматриваемую область потока. Для оценки равномерности распределения частиц по сечению канала предлагается использовать алгоритм, определяющий их концентрацию по серии кадров.

Целью данной работы является визуализация осредненных (по времени) полей концентрации частиц в двухфазном потоке в канале с помощью скоростной видеосъемки с последующей алгоритмической обработкой полученных изображений.

2. Экспериментальная установка для исследования нисходящих двухфазных потоков

Установка для исследования двухфазных течений (рис. 1) представляет собой вертикальный канал. На входе в канал установлена лемниската с питателем **1**, через который подается дисперсная фаза. Поток проходит начальный участок круглого сечения **2** (диаметр – 100 мм, длина – 1000 мм, материал – ПВХ). Через переходный участок **3** поток попадает в рабочий участок **4**, изготовленный из органического стекла, квадратного сечения со стороной 100 мм. Длина рабочего участка **4** 500 мм. Внутри рабочего участка **4** установлено обтекаемое цилиндрическое тело с плоским торцом **5** диаметром 17 мм. Выходной участок **6** соединяет рабочий участок **4** и пылеуловитель циклонного типа **7**, на который установлен вентилятор **8** с изменяемым расходом воздуха. Дисперсная фаза оседает в бункерах **9**, установленных на циклоне **7** и выходном участке **6**. Установка смонтирована на металлической раме **10**.

Лемниската **1**, переходный участок **3**, цилиндрическое тело **5** и бункеры **9** изготовлены при помощи аддитивных технологий (FDM) из полилактида (PLA).

Расход частиц варьируется изменением отверстия в питателе (от 1 до 10 г/с). Вентилятор позволяет создавать поток воздуха со скоростью до 8 м/с.

В процессе видеосъемки используется освещение светодиодным прожектором **11**, установленным перпендикулярно оси канала (в плоскости кадра). Для увеличения равномерности освещения прожектором рабочего участка применяются диффузионные фильтры.

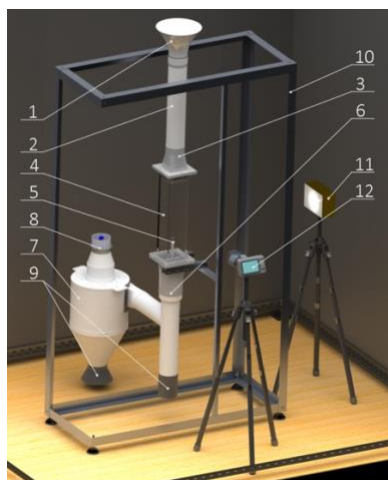


Рис. 1. Схема эксперимента по визуализации двухфазных потоков: **1** – лемниската с питателем; **2** – начальный участок; **3** – переходный участок; **4** – рабочий участок; **5** – обтекаемое тело; **6** – выходной участок; **7** – пылеуловитель; **8** – вентилятор; **9** – бункеры; **10** – рама; **11** – светодиодный прожектор; **12** – высокоскоростная камера

В качестве дисперсной фазы в эксперименте применяются стеклянные микросферы (рис. 2) (физическая плотность частиц – 2550 кг/м³) со средним диаметром 165 мкм (среднеквадратичное отклонение диаметра – 18 мкм).

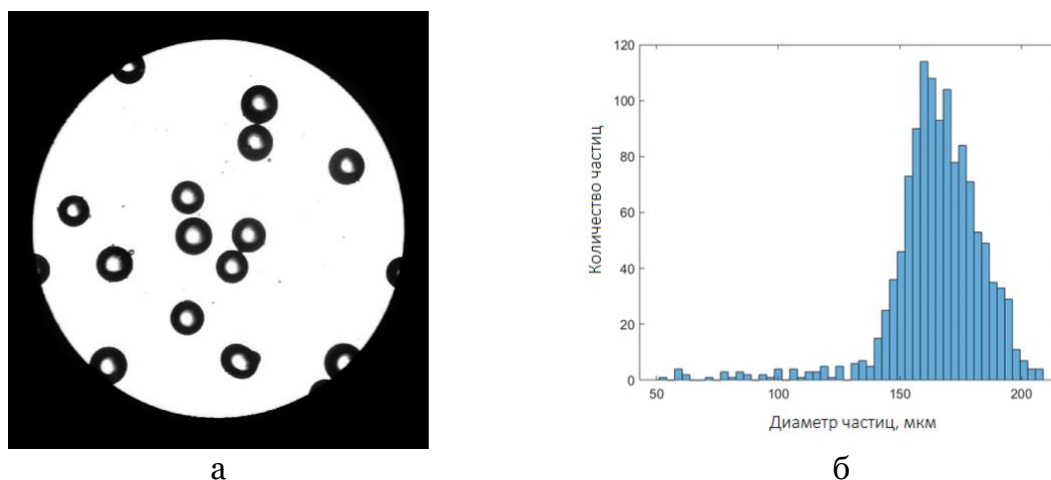


Рис. 2. Фотография частиц при 80-ти кратном увеличении (а); гистограмма распределения диаметров частиц (б)

Видеосъемка исследуемой области потока осуществляется высокоскоростной монохромной камерой F 1500-32-M (Evercam, Россия) (рис. 3). Предельное разрешение камеры составляет 1920x1088 пикселей при скорости съемки 1500 кадров в секунду. Увеличение скорости съемки возможно до 44000 кадров в секунду при уменьшении разрешения до 1920x16 пикселей. При съемке использовался объектив Зенитар 1,2/50s (Зенит, Россия).



Рис. 3. Высокоскоростная монохромная камера Evercam F 1500-32-M

Режимные параметры установки: скорость потока (ось рабочего участка) – 3 м/с; массовый расход частиц – 2,4 г/с; расход воздуха – 36,6 г/с. Параметры видеосъемки: выдержка – 1/1500 с; частота кадров – 2 Гц; диафрагма – f/2,0; фокусное расстояние объектива – 50 мм; разрешение получаемых кадров – 1920x1088 пикселей. Продолжительность эксперимента составляла 360 секунд.

3. Алгоритм идентификации частиц

При проведении данной работы использовался специально разработанный алгоритм идентификации частиц, написанный в среде MATLAB с использованием библиотеки Image Processing Toolbox.

В качестве исходных данных принимался набор монохромных изображений (рис. 4а), полученных из эксперимента. В ходе выполнения алгоритма при необходимости производилась обрезка изображений по интересующей области и инверсия в случае съемки теньвым фоновым методом. Далее выполнялась тоновая коррекция снимка для более отчетливого изображения границ частиц.

Затем определялось минимальное значение каждого пикселя для всего набора кадров. В итоге получалось изображение, в котором отсутствуют частицы, но присутствуют элементы установки (стенки рабочего участка, исследуемый объект, то есть фоновое изображение). Из текущего набора вычиталось (попиксельно) изображение минимальных значений (рис. 4б). Границы частиц становились более отчетливыми, и значительно уменьшался фоновый шум.

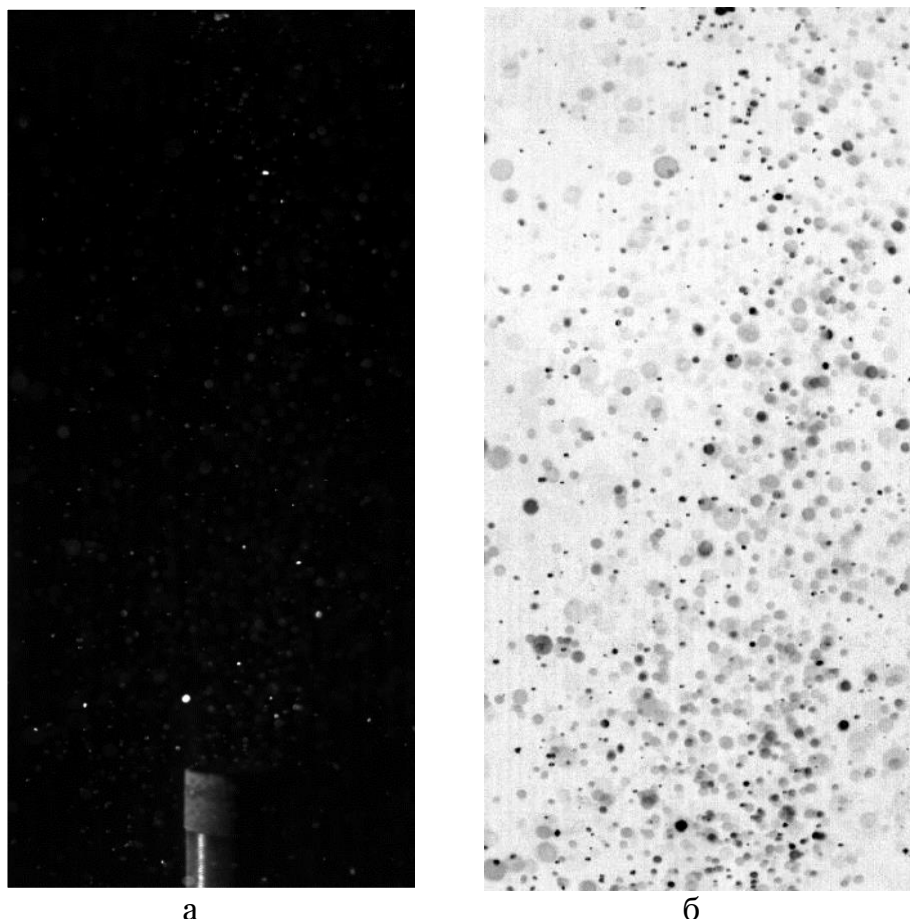


Рис. 4. Исходное изображение (а); обрезанное инвертированное изображение с вычтенным фоном (б)

Границы частиц определяются с помощью алгоритма Дж. Кэнни (J. F. Canny) [21]. Данный алгоритм позволяет получить бинарное изображение границ. Замкнутые области, представляющие частицы, заполняются. Ложные изображения разомкнутых границ отбрасываются (рис. 5а) при помощи операции морфологического открытия. По бинарному изображению частиц определяются некоторые параметры – положение центров масс частиц (рис. 5б), площадь, исходное изображение частицы, направления главных центральных осей. Каждому изображению ставится в соответствие набор данных о найденных частицах.

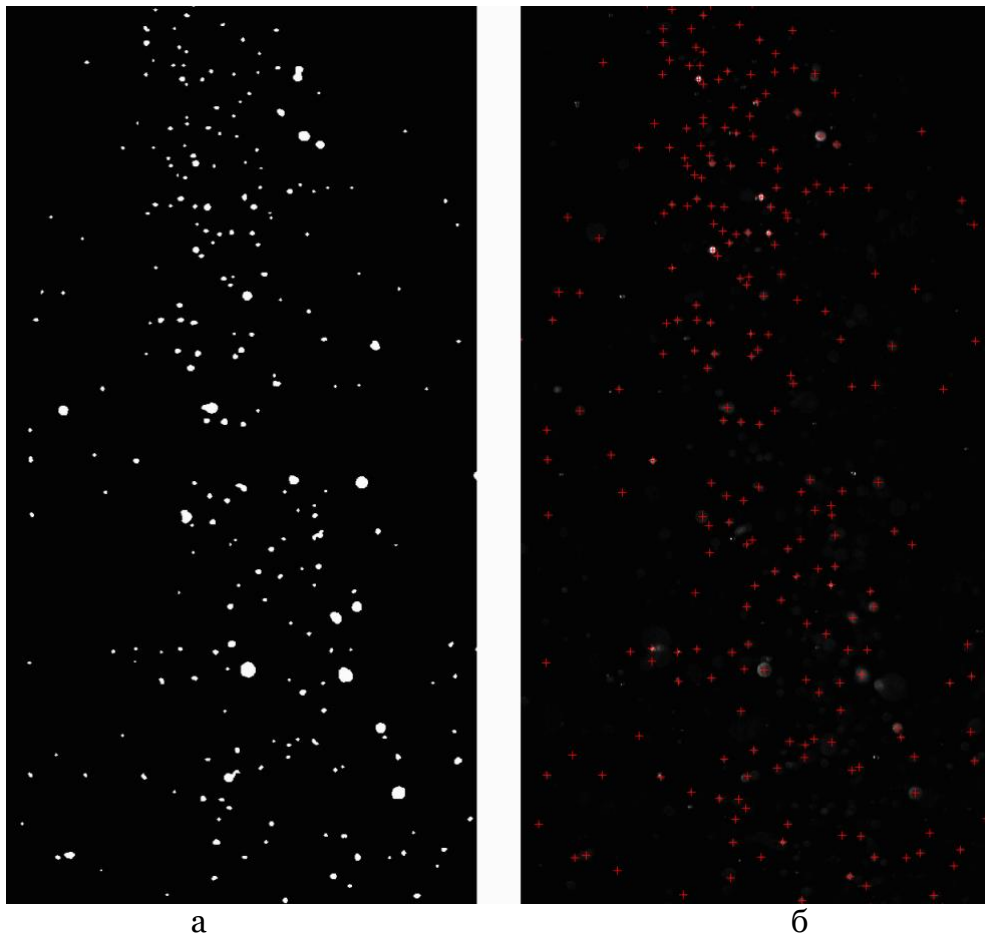


Рис. 5. Бинарное изображение границ частиц (а); положение центров масс частиц (б)

По среднему значению интенсивности изображения частицы (рис. 6) делается вывод о том, учитывать ли ее при дальнейшем анализе. При проведении съемки следует помнить о глубине резко изображаемого пространства (ГРИП): при открытой диафрагме хотя светосила оптической системы и является наибольшей, область резкости изображения сокращается. Это приводит к тому, что изображения частиц возле задней и передней стенки рабочего участка становятся нерезкими (рис 6б). В таком случае идентифицированные частицы с меньшей вероятностью проходят проверку по среднему значению интенсивности изображения.

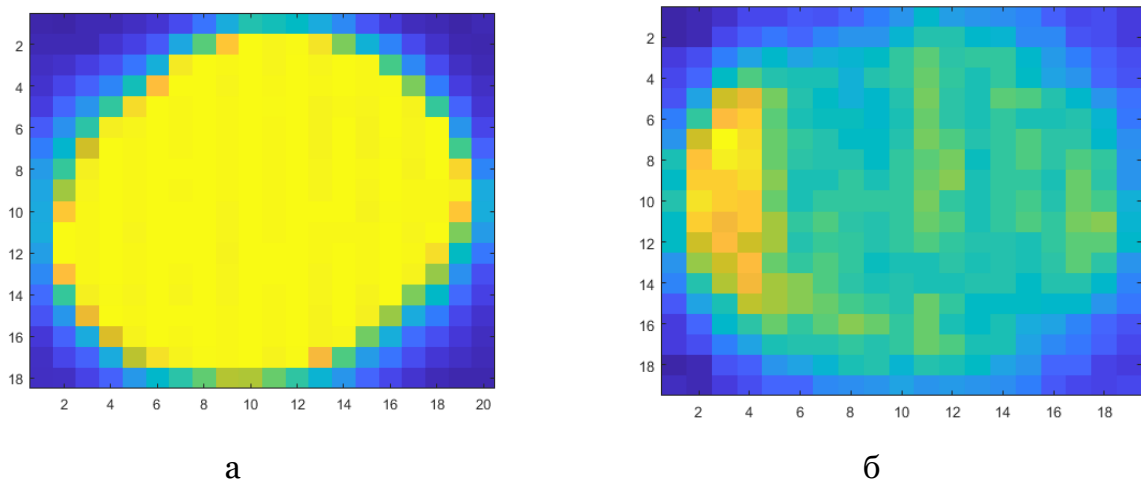


Рис. 6. Примеры изображений отдельных частиц: резкое изображение (а); нерезкое изображение (б)

4. Построение осредненных полей концентрации частиц

Одной из ключевых характеристик двухфазных течений является пространственное распределение частиц. Данные полученные при помощи алгоритма идентификации частиц возможно представить в виде «тепловой карты». Обрабатываемая область изображения рабочего канала разбивается на ячейки 20x20 пикселей. Далее подсчитывается количество частиц в каждой из ячеек по всему набору снимков (рис. 7а). Отношение количества частиц в расчетной ячейке по всем кадрам к количеству кадров определяет среднее значение количества частиц n_p в данной ячейке.

Подача частиц в поток реализована из отверстия в питателе диаметром 4 мм, что составляет 1/25 от поперечного размера рабочего канала. Из рисунка 7б видно, что дисперсная фаза, пройдя через начальный участок, поступает в рабочий участок неравномерно по сечению: от стенок к оси канала наблюдается рост концентрации. Угол раскрытия струи относительно оси канала составляет примерно 5-7°. При приближении потока к торцу обтекаемого тела происходит резкий рост концентрации (в 2 и более раза) за счет вклада в статистику отраженных частиц, движущихся навстречу основному потоку. В условиях слабозапыленного потока, встречные частицы достигают высоты порядка трех диаметров торца, что способствует появлению эффекта экранирования поверхности.

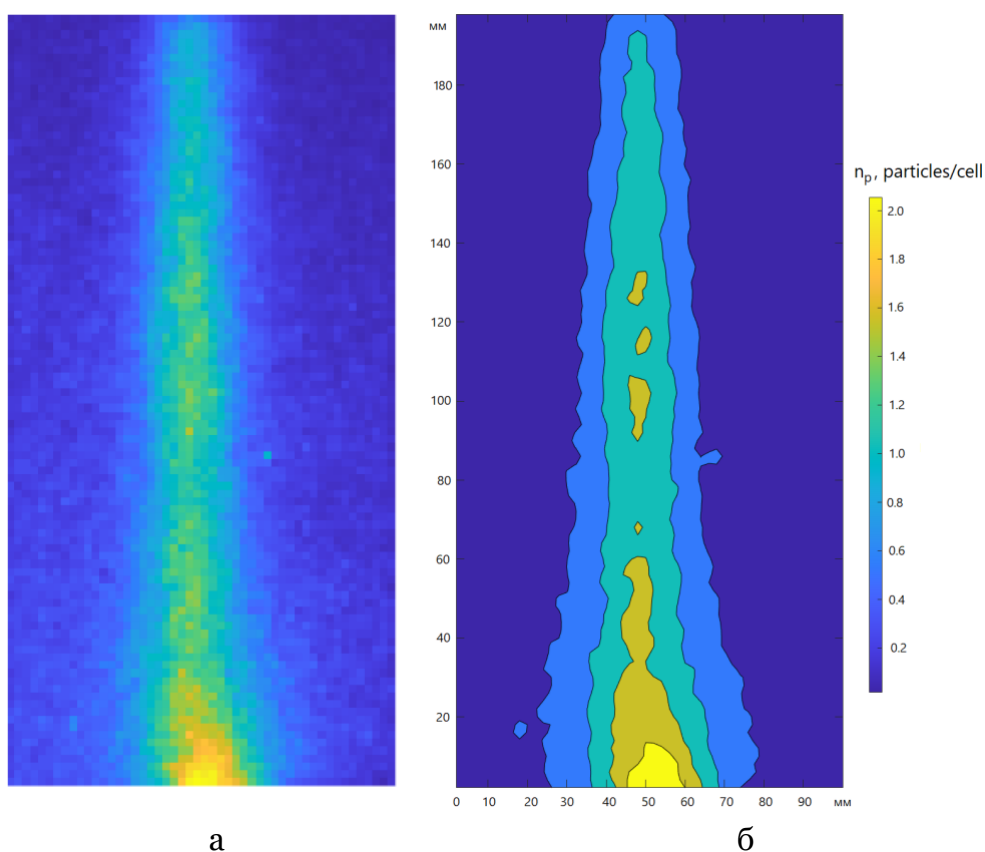


Рис. 7. Распределение частиц по рабочему участку: «тепловая карта» по квадратным ячейкам (а); контурный график (б)

5. Заключение

Авторами показана возможность определения полей концентрации частиц в многофазном потоке при помощи алгоритма Дж. Ф. Кэнни (J. F. Canny). Отработка предложенной методики на стеклянных микросферах показала достаточно достоверный результат, который согласуется с отдельно взятыми из выборки

экспериментальными снимками. Получены распределения частиц по области интереса рабочего участка и покадровые изображения частиц. Дальнейшая предложенная визуальная интерпретация данных наглядно демонстрирует, например, скачкообразный рост концентрации частиц в окрестности обтекаемого тела. Предложенная методика представляет интерес в исследовании эффекта экранирования поверхностей в запыленных потоках.

Список литературы

1. Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок / Под общей ред. А.Ю. Вараксина. М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2017. 680 с.
2. Михатулин Д.С., Полежаев Ю.В., Ревизников Д.Л. Теплообмен и разрушение тел в сверхзвуковом гетерогенном потоке. М.: Янус-К, 2007. 392 с.
3. Михатулин Д.С., Полежаев Ю.В., Ревизников Д.Л. Тепломассообмен, термохимическое и термоэрозионное разрушение тепловой защиты. М.: Янус-К, 2011. 520 с.
4. Сукомел А.С., Цветков Ф.Ф., Керимов Р.В. Теплообмен и гидравлическое сопротивление при движении газозвеси в трубах. М.: Энергия, 1977. 193 с.
5. Дейч М.Е., Филиппов Г.А. Газодинамика двухфазных сред. М.: Энергоиздат, 1981. 356 с.
6. Перельман Р.Г., Пряхин В.В. Эрозия элементов паровых турбин. М.: Энергоатомиздат, 1986. 181 с.
7. Varaksin A.Yu. Effect of particles on carrier gas flow turbulence. High Temperature, Vol. 53, № 3, 2015, P. 423–444.
8. Varaksin A.Yu. Two-phase boundary layer of gas with solid particles. High Temperature, Vol.58, № 5, 2020, P. 716–732.
9. Varaksin A.Yu. Collision of particles and droplets in turbulent two-phase flows. High Temperature, Vol.57, № 4, 2019, P. 555–572.
10. Varaksin A.Yu. Two-phase flows with solid particles, droplets, and bubbles: problems and research results (review). High Temperature, Vol.58, № 4, 2020, P. 595–614.
11. Varaksin A.Yu. Collisions in Particle-Laden Gas Flows. New York: Begell House, 2013.
12. Kiselev S.P., Kiselev V.P., Klinkov S.V., Kosarev V.F., Zaikovskii V.N. Study of the gas-particle radial supersonic jet in the cold spraying. Surface & Coatings Technology, Vol. 313, 2017, P. 24-30.
13. Klinkov S.V., Kosarev V.F., Shikalov V.S. Influence of nozzle velocity and powder feed rate on the coating mass and deposition efficiency in cold spraying. Surface & Coatings Technology, Vol. 367, 2019, P. 231-243.
14. Fomin V.M., Golyshv A.A., Kosarev V.F., Malikov A.G., Orishich A.M., Filippov A.A. Deposition of cermet coatings on the basis of Ti, Ni, WC, and B₄C by cold gas dynamic spraying with subsequent laser irradiation. Physical Mesomechanics, Vol. 23, 2020, P. 291-300.
15. Fortin G., Ilinca A., Laforte J.-L., Brandi V. A new roughness computation method and geometric accretion model for airfoil icing. J. of Aircraft, Vol. 41, № 1, 2004, P. 119-127.
16. Alekseenko S.V., Prikhod`ko A.A. Mathematical modeling of ice body formation on the wing airfoil surface. Fluid Dynamics, Vol. 49, № 6, 2014, P. 715-732.
17. Takahashi T., Fukudome K., Mamori H., Fukushima N., Yamamoto M. Effect of characteristic phenomena and temperature on super-cooled large droplet icing on NACA0012 airfoil and axial fan blade. Aerospace, Vol. 7, № 7, 2020, Paper No. 92.
18. Min S., Yee K. New roughness-induced transition model for simulating ice accretion on airfoils. AIAA Journal, Vol. 59, № 1, 2021, P. 250-262.
19. Molleson G.V., Stasenko A.L. Gas thermodynamics and optics of a monodisperse supersonic jet interacting with an aerodynamic body. High Temperature, Vol. 50, № 6, 2012, P. 755-764.

20. Molleson G.V., Stasenko A.L. Electro-optical phenomena in a gas-dispersed jet flow around a solid body. *High Temperature*, Vol. 53, № 6, 2015, P. 855-864.
21. Canny J. F. A computational approach to edge detection. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 8, 1986, P.678-698.

Recovery of Particle Concentration Fields by Two-Phase Flow Visualization around Bodies

A.A. Zhelebovskiy^{1,A}, A.A. Mochalov^{2,A,B}, A.Yu. Varaksin^{3,A,B}

^A Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

^B Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

¹ ORCID: 0000-0003-2360-6665, zhelebovsk@gmail.com

² ORCID: 0000-0003-3078-1277, artem.mochalov@yandex.ru

³ ORCID: 0000-0002-8799-6378, varaksin_a@mail.ru

Abstract

Measurement of the fields of particle concentration is one of the main task in research area of the two-phase flows around bodies in ‘gas – solid particles’ case. The paper considers the reconstruction of the concentration fields of solid particles by identifying their images. An experimental setup scheme for analysis of the structure of downward two-phase flow is presented. The main parameters of the experimental setup are as follows: geometry of the working area, air flow velocity, air flow rate, mass flow rate of particles. An optical monochrome setup for recording fast processes is briefly described. A method for processing experimental images based on the Canny edge detector is proposed. The processing algorithm for the experimental images was tested on glass microspheres used as a dispersed phase. The original image and a size distribution histogram for microstructures are presented. Examples of individual images of microspheres in a flow are considered for data validation. The experimental determination of the particle concentration fields in the downward flow and in the vicinity of the streamlined body are presented.

Keywords: visualization, high-speed camera, two-phase flow, density concentration, particle detection.

References

1. Teoriya i proektirovanie gazoturbinnnyh i kombinirovannyh ustanovok [Theory and Design of Gas Turbine and Combined Plants]. Varaksin A.Yu. Ed. Moscow: Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, 2017.
2. Mikhatulin D.S., Polezhaev Yu.V., Reviznikov D.L. Teploobmen i razrushenie tel v sverkhzvukovom geterogennom potoke [Heat Transfer and Destruction of Bodies in a Supersonic Heterogeneous Flow]. Moscow: Yanus-K, 2007.
3. Mikhatulin D.S., Polezhaev Yu.V., Reviznikov, D.L., Teplomassoobmen, termokhimicheskoe i termoerozionnoe razrushenie teplovoi zashchity [Heat and Mass Transfer, Thermochemical and Thermal Erosion Destruction of Thermal Protection]. Moscow: Yanus-K, 2011.
4. Sukomel A.S., Tsvetkov F.F., Kerimov R.V. Teploobmen i gidravlichesкое soprotivlenie pri dvizhenii gazovzvesi v trubakh [Heat Transfer and Hydraulic Resistance during the Movement of Gas Suspension in Pipes]. Moscow: Energiya, 1977.
5. Deich M.E., Filippov G.A. Gazodinamika dvukhfaznykh sred [Gas Dynamics of Two-Phase Media]. Moscow: Energoizdat, 1981.
6. Perel'man R.G., Pryakhin V.V. Eroziya elementov parovykh turbin [Erosion of Steam Turbine Components]. Moscow: Energoatomizdat, 1986
7. Varaksin A.Yu. Effect of particles on carrier gas flow turbulence. High Temperature, Vol. 53, № 3, 2015, P. 423–444.

8. Varaksin A.Yu. Two-phase boundary layer of gas with solid particles. *High Temperature*, Vol.58, № 5, 2020, P. 716–732.
9. Varaksin A.Yu. Collision of particles and droplets in turbulent two-phase flows. *High Temperature*, Vol.57, № 4, 2019, P. 555–572.
10. Varaksin A.Yu. Two-phase flows with solid particles, droplets, and bubbles: problems and research results (review). *High Temperature*, Vol.58, № 4, 2020, P. 595–614.
11. Varaksin A.Yu. *Collisions in Particle-Laden Gas Flows*. New York: Begell House, 2013.
12. Kiselev S.P., Kiselev V.P., Klinkov S.V., Kosarev V.F., Zaikovskii V.N. Study of the gas-particle radial supersonic jet in the cold spraying. *Surface & Coatings Technology*, Vol. 313, 2017, P. 24-30.
13. Klinkov S.V., Kosarev V.F., Shikalov V.S. Influence of nozzle velocity and powder feed rate on the coating mass and deposition efficiency in cold spraying. *Surface & Coatings Technology*, Vol. 367, 2019, P. 231-243.
14. Fomin V.M., Golyshev A.A., Kosarev V.F., Malikov A.G., Orishich A.M., Filippov A.A. Deposition of cermet coatings on the basis of Ti, Ni, WC, and B₄C by cold gas dynamic spraying with subsequent laser irradiation. *Physical Mesomechanics*, Vol. 23, 2020, P. 291-300.
15. Fortin G., Ilinca A., Laforte J.-L., Brandi V. A new roughness computation method and geometric accretion model for airfoil acing. *J. of Aircraft*, Vol. 41, № 1, 2004, P. 119-127.
16. Alekseenko S.V., Prihod`ko A.A. Mathematical modeling of ice body formation on the wing airfoil surface. *Fluid Dynamics*, Vol. 49, № 6, 2014, P. 715-732.
17. Takahashi T., Fukudome K., Mamori H., Fukushima N., Yamamoto M. Effect of characteristic phenomena and temperature on super-cooled large droplet icing on NACA0012 airfoil and axial fan blade. *Aerospace*, Vol. 7, № 7, 2020, Paper No. 92.
18. Min S., Yee K. New roughness-induced transition model for simulating ice accretion on airfoils. *AIAA Journal*, Vol. 59, № 1, 2021, P. 250-262.
19. Molleson G.V., Stasenko A.L. Gas thermodynamics and optics of a monodisperse supersonic jet interacting with an aerodynamic body. *High Temperature*, Vol. 50, № 6, 2012, P. 755-764.
20. Molleson G.V., Stasenko A.L. Electro-optical phenomena in a gas-dispersed jet flow around a solid body. *High Temperature*, Vol. 53, № 6, 2015, P. 855-864.
21. Canny J. F. A computational approach to edge detection. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 8, 1986, P.678-698.