

ИЗМЕРЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ САМОСВЕТЯЩИХСЯ ЧАСТИЦ В СВЕРХЗВУКОВОМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ ПОТОКЕ

© 2012 г. А. В. Воронцовский**, доктор техн. наук; В. Н. Михайлов*, канд. физ.-мат. наук; Н. В. Петров*, канд. физ.-мат. наук; Д. И. Стаселько*, доктор физ.-мат. наук

* Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

** Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва

E-mail: dmitry@staselko.spb.ru

Представлен метод записи и обработки изображений треков самосветящихся быстролетающих частиц в высокотемпературных газовых потоках, основанный на использовании отечественной скоростной цифровой камеры с матричным фотоприемником “*Nanogate-2*” с временным разрешением 10 нс. С помощью специально разработанного программного обеспечения обработаны экспериментальные данные, полученные на стенде МГТУ им. Н.Э. Баумана для исследования сверхзвукового напыления покрытий. Найдены радиальные распределения частиц по скоростям и концентрациям, а также их временные и статистические характеристики, необходимые для оценки эффективности воздействия таких потоков на обрабатываемые поверхности.

Ключевые слова: анемометрия, скоростная съемка, цифровая обработка изображений, анализ изображений.

Коды OCIS: 100.2000, 100.2960, 120.0120, 120.1740, 280.7250

Поступила в редакцию 01.08.2011

Введение

Методы изучения параметров частиц в потоках, основанные на обработке индивидуальных изображений частиц (PIV – *Particle image velocimetry*), находят широкое применение при изучении процессов тепло- и массопереноса в высокоскоростных и высокотемпературных двухфазных потоках, используемых в ракетных двигателях и технологических установках для обработки материалов, а также при контроле ряда производственных процессов. Наиболее распространенным и разработанным является метод, основанный на подсветке изучаемых ансамблей частиц двумя короткими лазерными импульсами с регулируемым временным интервалом между ними (метод парных импульсов) [1, 2].

Однако возможности получения качественных изображений частиц, пригодных для по-

следующей обработки, при использовании лазерной подсветки существенно ограничиваются пространственно-неравномерным спекл-фоном, создаваемым за счет рассеяния когерентного излучения лазера на расфокусированных частицах. Яркость этого фона возрастает по мере увеличения концентрации частиц в потоке и достигает критического значения при концентрациях 10^2 – 10^4 см⁻³ [3–5], когда изображения частиц становятся практически неразличимыми. Методы с использованием импульсной лазерной подсветки позволяют изучать двухфазные потоки только с невысокой концентрацией частиц.

Значительное (более чем на два порядка) снижение требований к уровню фона достигается при использовании некогерентного излучения для визуализации частиц [6]. Так при изучении высокотемпературных потоков частиц последние могут быть визуализированы

в некогерентном свете благодаря испусканию ими собственного теплового излучения. В этом случае фон становится гораздо более равномерным, что способствует лучшему различению изображений изучаемых ансамблей частиц. Для такой регистрации весьма эффективными современными устройствами являются фотокамеры на основе матричных фотоприемников и управляемых высокоскоростных оптических затворов. В этом случае изображения движущихся раскаленных частиц регистрируются в виде треков, длина которых определяется скоростью движения частиц и длительностью экспозиции, задаваемой затвором. Таким образом не только значительно улучшаются условия распознавания индивидуальных изображений частиц, но и отпадает необходимость в использовании сложных и дорогостоящих источников лазерного излучения, а также предельно упрощается схема проведения эксперимента.

Экспериментальная установка

Эксперименты по PIV-регистрации треков быстродвижущихся частиц проводились на сверхзвуковом стенде МГТУ с использованием высокоскоростной электронно-оптической цифровой камеры “*Nanogate-2*” отечественного производства.

Исследуемый сверхзвуковой высокотемпературный двухфазный поток тугоплавких частиц с размерами от 10 до 45 мкм формировался с помощью спиртовой горелки и профилированного сопла, обеспечивавшего заданную скорость и форму потока. Температура потока составляла 1500–2000 К. Форма получалась близкой к цилиндрической на протяжении метра от среза сопла, а скорость потока регулировалась в интервале от 1500 до 1000 м/с. Частицы равномерно подавались в камеру горелки через несколько секунд после установления равномерного режима горения.

Спектральная характеристика матричных фотоприемников камеры “*Nanogate-2*” позволяла регистрировать изображения в диапазоне от 380 до 800 нм, а их высокая чувствительность создавала возможность получать изображения треков при уровне сигналов до ста фотонов на один фотоприемник (пиксел) в области наибольшей спектральной чувствительности используемой матрицы, число пикселов которой составляло 768×580. Длительность экспозиции могла быть установлена в пределах от 10 нс до 20 мкс с шагом 10 нс. Расстоя-

ние от среза сопла до оси оптической системы, перпендикулярной оси струи, составляло 280 мм. Объектив фотокамеры (“Юпитер-6” 180/2,8) располагался на расстоянии около 500 мм от оси струи.

Длительность экспонирования отдельных кадров выбиралась в диапазоне от 2 до 10 мкс исходя из компромисса между точностью измерения скорости и контрастом наблюдаемых изображений. Время работы горелки изменялось от 1 до 3 мин, а массовый расход частиц – от 0,5 до 0,15 г/с. Частота регистрации изображений частиц достигала 5 Гц, что позволило регистрировать до 300 изображений в течение одного эксперимента.

На изображении общего вида струи, на ее конце, с момента добавления частиц в горелку отчетливо наблюдалась характерная дополнительная линейчатая структура, ориентированная по оси струи, которая обусловлена собственным свечением частиц.

Анализ динамики развития структуры струи показал, что в течение первых 15 с от момента начала подачи частиц наблюдается постепенный рост количества треков в поле зрения системы регистрации от единиц до нескольких десятков. При этом их скорость возрастает от 200–300 до 500–700 м/с. После того устанавливался квазистационарный режим, который затем достаточно резко (за единицы секунд) прерывался после прекращения подачи частиц. Для последующей статистической обработки использовались кадры, относящиеся к указанному квазистационарному режиму.

Регистрация изображений проводилась в двух режимах с использованием различного увеличения (1 и 0,2). Первое из них позволило повысить точность измерений скорости частиц, тогда как второе создавало возможность более полного обзора общей картины потока частиц. Поперечные размеры изображений треков частиц в обоих режимах существенно превосходили диаметры частиц, так что последующая обработка изображений выявляла информацию о скоростях частиц и распределении их в пространстве, но не позволяла судить об их размерах.

Примеры полученных изображений приведены на рис. 1а, б (однократное увеличение) при различных длительностях экспонирования (2 мкс и 5 мкс соответственно) и на рис. 1в, г при пятикратном уменьшении и двух значениях давления в камере форсунки – 0,9 МПа и 1,1 МПа соответственно. Следует отметить,

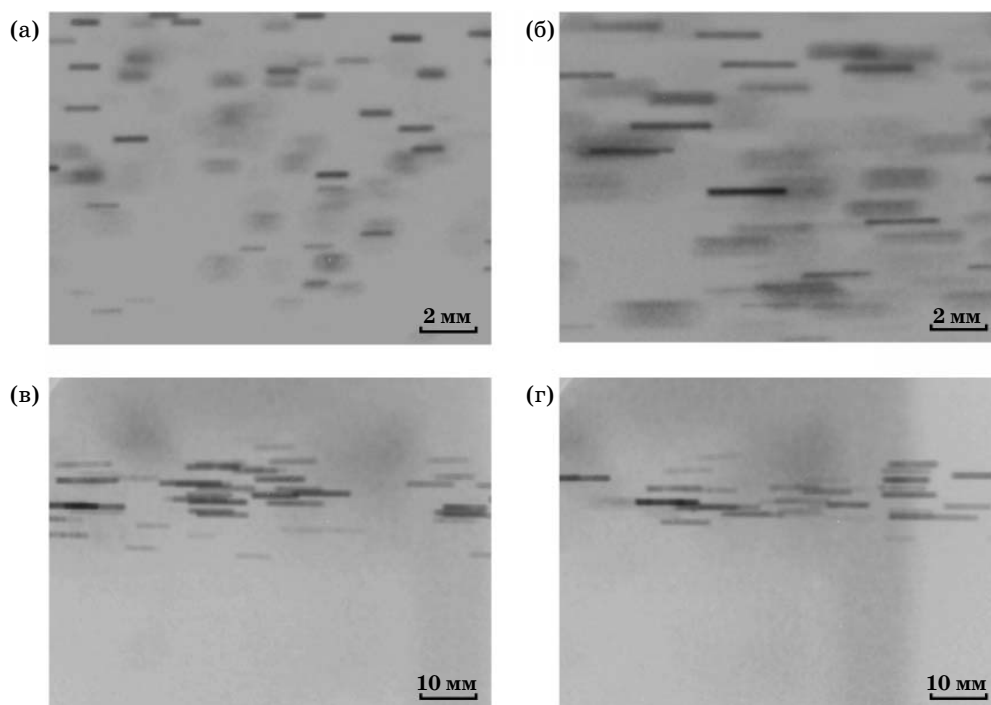


Рис. 1. Изображения светящихся треков частиц (негатив). а – при длительности экспонирования $\Delta t = 2$ мкс, б – при $\Delta t = 5$ мкс, в – при давлении в камере сгорания горелки $p = 0,9$ МПа и $\Delta t = 10$ мкс, г – при $p = 1,1$ МПа и $\Delta t = 10$ мкс. Расход частиц во всех случаях составлял $0,2$ г/с.

что на уменьшенных изображениях особенно отчетливо проявляется существенная неоднородность плотности частиц как вдоль оси потока, так и в поперечном направлении.

Перед компьютерным анализом полученные изображения обращались в негативные распределения интенсивности, которые затем подвергались операции гамма-коррекции крутизны границ контуров треков. Такая обработка упростила идентификацию частиц на изображениях в виде резких и частично расфокусированных треков, ориентированных по оси потока. Длины треков составляли от 1 до 8 мм и возрастали в соответствии с увеличением длительности экспонирования от 2 до 10 мкс. Таким образом, примерная оценка скоростей дает значение порядка 600 м/с. Это согласуется с ожидаемыми расчетными значениями, лежащими в диапазоне 500–800 м/с.

Программное обеспечение для обработки экспериментальных результатов

Поскольку в условиях эксперимента отношение сигнал/шум регистрируемых изображений было сравнительно невысоким (от 1,5 до 3), потребовалась разработка специализированной

программы, обеспечивающей достаточно надежное распознавание частиц.

Для формирования программного алгоритма, удовлетворяющего условиям задачи, была использована многофункциональная среда National Instruments LabVIEW, основанная на графическом языке программирования “G”, в сочетании со специализированным графическим модулем National Instruments IMAQ Vision. Данная среда позволяет осуществлять все необходимые действия с полученными из изображения данными, а выбранный модуль представляет собой обширный и удобный в использовании набор библиотек средств обработки и анализа изображений.

Обрабатываемые изображения треков частиц представляют собой наборы горизонтальных сфокусированных и расфокусированных полос различной длины и ширины, частично накладывающихся друг на друга. К тому же они существенно отличаются по яркости, что значительно осложняет использование традиционной простой процедуры выявления частиц посредством пороговой (*threshold*) обработки их изображений.

Для решения этой задачи были разработаны два варианта программного обеспечения, подробное описание которых приведено в ра-

боте [7]. Основное различие между ними связано со степенью участия оператора в процессе обработки. В первом случае (полуавтоматический режим) оператор имеет возможность контролировать процесс выбора частиц для последующей обработки, что несколько повышает надежность данной процедуры, но требует дополнительных временных затрат. Во втором случае алгоритм позволяет автоматически проводить измерения длины треков частиц, что существенно уменьшает время обработки, но приводит к необходимости тщательной настройки начальных параметров модуля для достижения достоверных результатов, приближающихся к результатам, полученным с участием оператора.

Рассмотрим последовательность операций в рамках созданного программного обеспечения. На первом этапе оператором или автоматизированным программным алгоритмом выделяются контуры областей, внутри которых находятся изображения треков. Затем программа, сканируя выделенные фрагменты изображения в двух ортогональных направлениях – вдоль и поперек оси выбранных областей, последовательно находит в них перепады яркости от светлого к темному и обратно, тем самым определяя размеры и координаты треков частиц. На заключительном этапе полученные данные о треках суммируются и проводится построение распределений исследуемых частиц по скоростям и в пространстве.

В автоматическом режиме выделения областей, содержащих треки частиц, изображение сканировалось по прямым линиям, направленным вдоль треков. Расстояние между линиями сканирования выбиралось несколько большим, чем средняя ширина трека. Это позволяло избежать повторного счета частиц при переходе от одной линии к другой. Как показал опыт работы с автоматизированной программой, статистическая достоверность получаемых результатов существенно зависит от размеров выделяемых областей. Оптимальный размер определялся исходя из соответствия результатов, полученных с помощью автоматического выделения контуров, и результатов, полученных на основе их ручного выделения.

В целом разработанное программное обеспечение позволило получить исчерпывающую информацию о ряде важных характеристик потока исследуемых частиц: общем распределении частиц по скоростям в объеме струи, картине распределения скоростей вдоль ее оси,

а также о радиальных распределениях средних скоростей и концентраций частиц. При этом усреднение по скоростям проводилось как с использованием среднеарифметических значений, так и наиболее вероятных значений, соответствующих экспериментально полученным гистограммам скоростей, для частиц, находившихся на заданном расстоянии от оси потока.

Было установлено, что использование наиболее вероятных значений скоростей соответствует ожидаемому на основе физических соображений плавному убыванию скоростей по мере удаления от оси струи. В случае же среднеарифметических значений, получаемая радиальная зависимость характеризовалась чередующимися отклонениями значений скоростей по мере перемещения к периферии как в большую, так и в меньшую стороны в пределах нескольких процентов от значений на оси.

Одним из основных параметров разрабатываемой системы и режимов ее работы является продолжительность обработки изображений. При выделении областей, содержащих изображения треков, в полуавтоматическом режиме длительность обработки минимального массива данных, достаточного для статистически достоверного анализа характеристик изучаемых потоков (до 1000 частиц), достигает одного часа. Для получения аналогичного результата с использованием автоматизированного алгоритма на компьютере средней производительности (типа Pentium IV) требуется не более одной минуты.

Расхождение получаемых таким образом результатов с результатами полуавтоматической обработки не превышало 5–15%. Время, необходимое для изменения условий эксперимента, составляло 15–20 мин. Это обеспечивало получение результатов обработки изображений практически в режиме реального времени и давало возможность оперативно управлять проведением экспериментов с учетом получаемых в их ходе результатов, что значительно увеличило эффективность работы установки.

Обсуждение полученных результатов

С помощью разработанного специализированного программного обеспечения на основе экспериментальных данных, полученных на стенде МГТУ, найдены радиальные распределения частиц по скоростям и концентрациям, необходимые для оценки эффективности воз-

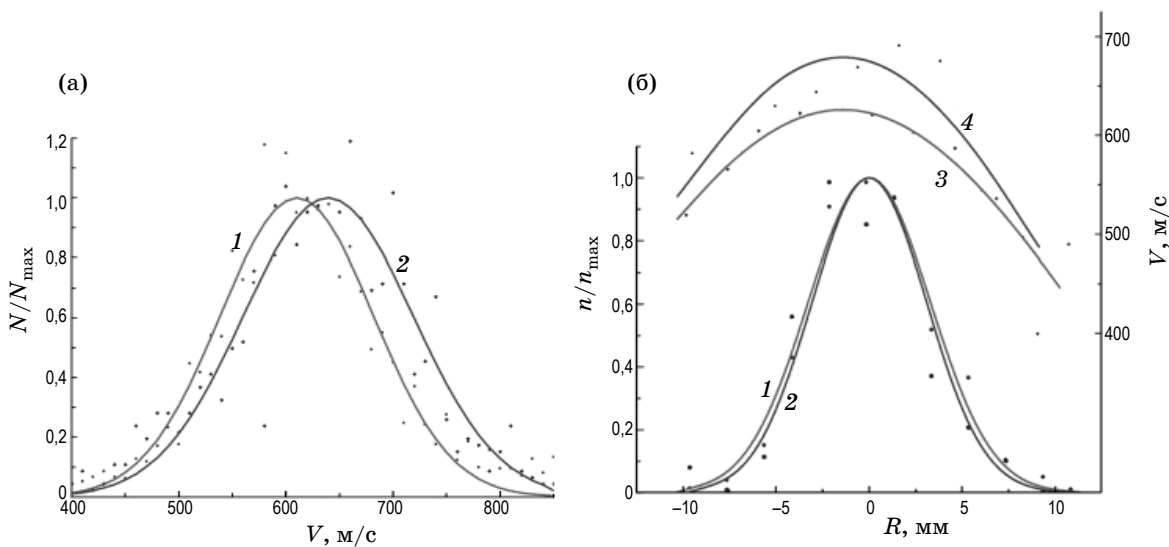


Рис. 2. Экспериментально измеренные нормированные радиальные распределения частиц по скоростям (а) и концентрациям (б).

действия таких потоков на обрабатываемые поверхности при нанесении покрытий и резке образцов.

Полученные результаты представлены на рис. 2. На рис. 2а изображены графики, соответствующие нормированным распределениям числа частиц N/N_{\max} по скоростям V с аппроксимацией гауссовыми кривыми (сплошные линии). Кривые с номером 1 соответствуют давлению 0,9 МПа в камере сгорания горелки, с номером 2 – 1,1 МПа.

В эксперименте при давлении 0,9 МПа было обработано 4420 частиц. При этом средняя скорость частиц составила 610 м/с, а среднеквадратическое отклонение – 71 м/с. При давлении 1,1 МПа обработано 980 частиц, получены средняя скорость 670 м/с и среднеквадратическое отклонение – 79 м/с. Ширина на половине высоты для аппроксимирующих гауссовых кривых: 166,8 м/с при 0,9 МПа и 184,6 м/с при 1,1 МПа.

Анализ погрешностей, проведенный путем сопоставления выборки, полученной в результате автоматического оконтуривания с контрольной выборкой, полученной вручную, дает погрешность при определении средней скорости в пределах 2–5% – 610 м/с против 608 м/с для 0,9 МПа, и 670 м/с против 689 м/с для 1,1 МПа. Как видно из полученных результатов, при увеличении давления с 0,9 до 1,1 МПа средняя скорость частиц увеличива-

лась с 608 м/с до 689 м/с, при этом наблюдалось некоторое уширение дисперсионной зависимости.

Кроме этого, также были вычислены нормированные распределения концентрации частиц n/n_{\max} по сечению R (рис. 2б, кривые 1 и 2 для давлений 0,9 и 1,1 МПа соответственно) и распределения скоростей частиц по сечению (рис. 2б, кривые 3 и 4 для давлений 0,9 и 1,1 МПа соответственно). Видно, что распределения скоростей и числа частиц по сечению в обоих режимах характеризуются экстремальными значениями на оси потока и близки друг к другу. Ширина распределения частиц по половинному уровню составляет около 10 мм, что примерно соответствует диаметру струи, полученному согласно аэродинамическим оценкам.

Наряду со средними статистическими характеристиками потока были изучены отклонения полученных пространственно-скоростных распределений от равновероятного распределения, описываемого пуассоновской статистикой. При непосредственном визуальном рассмотрении тысяч снимков изучаемых потоков была замечена значительная неоднородность в распределении плотности частиц как в продольном, так и поперечном направлениях.

Практически на каждом из снимков заметная часть треков группировалась в виде локальных сгустков, или уплотнений. С целью коли-

чественного анализа отмеченной особенности рассчитана продольная корреляция плотности частиц во всем массиве полученных изображений по элементам объема струи, задаваемым в виде поперечных по отношению к оси струи дисков толщиной 6,85 мм, примерно соответствующей удвоенной средней длине треков частиц в потоке.

Для этого каждый из снимков, имеющих продольный размер 26,3 мм, разбивался на 3 фрагмента указанной выше толщины и фиксировалось количество треков частиц внутри каждого из них. В случае статистически равномерного распределения частиц по областям справедливо распределение Пуассона с параметром λ , равным отношению общего числа частиц в данной выборке изображений к количеству обработанных фрагментов. Таким образом определялась усредненная по поперечному сечению продольная концентрационная корреляция плотности потока частиц.

На верхней части рис. 3а для давления в камере горелки 0,9 МПа, показаны функции вероятности пуассоновского распределения (кривая 1) и распределения, соответствующего экспериментальным данным (кривая 2). Для наглядности на рис. 3б приведены массовые доли частиц в этих распределениях, определяемые произведениями ординат точек предыдущих графиков на их абсциссы. При давлении 1,1 МПа картины указанных распределений имели аналогичный вид, но характеризовались меньшим параметром λ .

Как следует из рис. 3, в случае пуассоновской статистики основная часть частиц должна была бы распределяться сравнительно равномерно по объему струи, заполняя каждый из

рассматриваемых фрагментов заданных формы и размера в количестве от 2 до 5. В то же время отчетливо видно, что распределения, построенные на основе экспериментальных данных, заметно отличаются от рассчитанных. Так количество незаполненных частицами (“пустых”) фрагментов в реальных распределениях возрастает по сравнению с пуассоновскими в 1,5–3 раза.

Одновременно с этим многократно, в десятки раз, возрастает число фрагментов с высокой степенью заполнения (более 5 частиц на фрагмент), которые должны были бы практически полностью отсутствовать согласно пуассоновской статистике. Отметим также заметное возрастание наблюдаемых статистических отклонений при уменьшении рабочего давления в камере.

Эти отличия свидетельствуют о формировании в исследованных потоках большого количества локальных пространственно скоррелированных групп частиц – “денситонов”, образующих области с аномально высокой плотностью частиц и характеризующихся продольными размерами порядка 5–15 мм. Вероятными причинами возникновения таких групповых уплотнений являются, по-видимому, флуктуации параметров рабочего процесса в камере горелки и нестабильность массового расхода частиц, а также значительный разброс частиц по скоростям.

Последнее обстоятельство приводит к динамической неустойчивости “денситонов” в пространстве и времени, следствием чего являются одновременно происходящие процессы распада прежних и образования новых уплотнений частиц по мере распространения струи. Теоре-

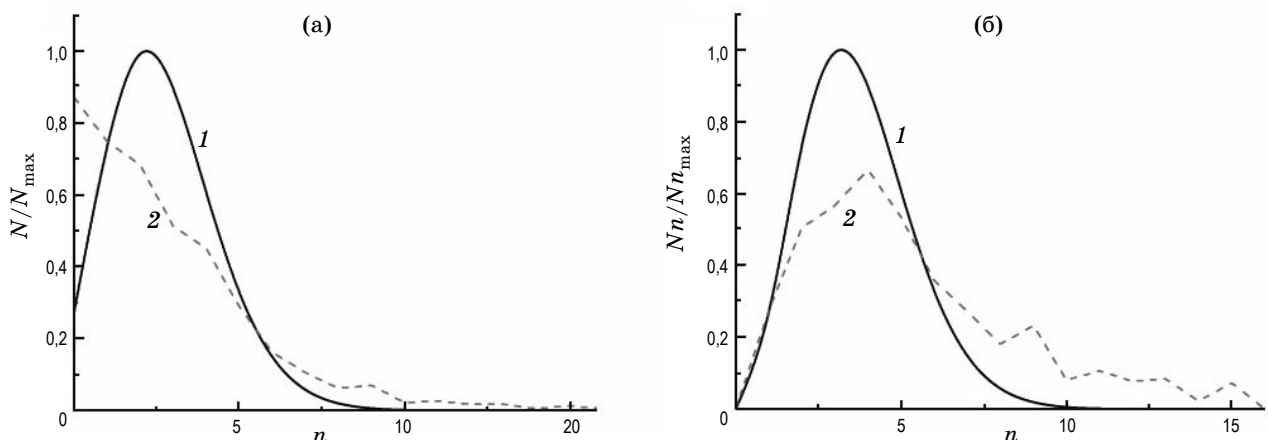


Рис. 3. Рассчитанные согласно пуассоновской статистике (кривые 1) и экспериментальные (кривые 2) нормированные распределения плотности частиц в потоке (а) и массовой доли частиц (б).

тический анализ подобного рода неустойчивостей мог бы явиться, по мнению авторов, предметом самостоятельного изучения.

Из сопоставления площадей под графиками на рис. 3 следует, что в формирование обнаруженных динамических “денситонов” оказывается вовлечено в среднем до 20% частиц от их общего числа. Это значение по существу характеризует кратковременную пространственно-временную нестабильность процесса обработки поверхности объектов, подвергаемых воздействию высокотемпературных двухфазных потоков [8], что следует учитывать при анализе воздействия таких потоков на обрабатываемые поверхности.

Для выяснения механизма и условий формирования наблюдаемых динамических “денситонов” – неустойчивых в пространстве и времени локальных флуктуаций плотности частиц, необходимо дальнейшее более детальное изучение их статистики как по длине, так и сечению потока в зависимости от ключевых параметров эксперимента. Особенно это касается сопоставления результатов экспериментов с расчетами в приближении пуассоновского распределения частиц. Как было отмечено выше, в работе использовалось значение параметра λ (среднего значения плотности частиц), усредненного по сечению потока, что вносило заве-

домую погрешность в сопоставление экспериментальных и расчетных данных вследствие непостоянства концентраций частиц в радиальном сечении. В дальнейших исследованиях это обстоятельство необходимо принимать во внимание.

Таким образом, представленный метод, разработанные оптическая система регистрации и автоматизированная система обработки данных обеспечили надежное определение основных параметров частиц в сверхзвуковом высокотемпературном двухфазном потоке – распределение скоростей, а также концентраций частиц по сечению потока и вдоль его оси. Выявлен неравномерный пространственно-временной характер распределения частиц в потоке, характеризующий нестабильность процесса обработки поверхности объектов, подвергаемых воздействию высокотемпературных двухфазных потоков.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 09-08-00947. Авторы благодарны профессору В.Г. Беспалову за поддержку работы, сотрудникам НИИЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана С.А. Сучкову и Л.А. Филимонову за помощь в проведении экспериментов на стенде МВТУ, а также профессору Р.П. Филимонову за ценные замечания, связанные со статистической оценкой полученных экспериментальных результатов.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. *Grant I.* Particle Image Velocimetry: a review // Proc. Instn. Mech. Engrs. 1997. V. 211. Part C. P. 55–76.
2. *Lourenco L., Krothapalli A.* On the accuracy of velocity and vorticity measurements with PIV // Experiments in Fluids. 1995. V. 18. P. 421–428.
3. *Стаселько Д.И., Косниковский В.А.* Голографическая регистрация пространственных ансамблей быстро движущихся частиц // Опт. и спектр. 1973. Т. 34. № 3. С. 365–374.
4. *Нищета В.В., Зубарев Ю.В., Минина В.П., Стаселько Д.И.* Исследование гетерогенных высокоскоростных потоков методом голографии / в кн. “Горение и взрыв”. М.: Наука, 1977. С. 347–348.
5. *Staselko D., Golyakov A.* 3-D holographic images of small moving particles: information capacity, minimal signal, spatial volume and resolution // Proc. Internat. Conf. EUROMECH 411 “Application of PIV, Turbulence measurements, Developments of 3D Stereoscopic and Holographic techniques”. University of Rouen, France. May 29–31, 2000. P. 61–65.
6. *Косниковский В.А., Стаселько Д.И.* Исследование качества изображений когерентно-освещенных объектов, наблюдаемых через объемные ансамбли частиц // Опт. и спектр. 1980. Т. 49. № 4. С. 774–781.
7. *Воронцовский А.В., Михайлов В.Н., Петров Н.В., Стаселько Д.И.* Экспериментальное исследование пространственно-скоростных параметров частиц в сверхзвуковом двухфазном потоке // Труды НИЦ фотоники и оптоинформатики. СПб.: ИТМО, 2009. С. 347–359.
8. *Дейч М.Е., Филлипов Г.А.* Газодинамика двухфазных сред. М.: Энергоиздат, 1981. 471 с.