

УДК 536.524

## Измерение системой PIV средних и пульсационных скоростей в газокапельной струе с низкой концентрацией дисперсной фазы\*

В.И. Терехов, Д.Ю. Стародумова, К.А. Шаров

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

E-mail: terekhov@itp.nsc.ru

С помощью системы Particle Image Velocimetry (PIV) проведено исследование влияния малых концентраций дисперсной фазы на средние и пульсационные характеристики потока на автомодельном участке двухфазной затопленной струи. Освоена методика разделения фаз по интенсивности отраженного сигнала. Получены распределения средних скоростей и пульсаций скорости в несущей и дисперсной фазах газокапельной струи. Показано, что, несмотря на малую концентрацию дисперсной фазы, наличие крупных капель в потоке снижает интенсивность пульсаций скорости газовой фазы.

**Ключевые слова:** затопленная струя, двухфазные потоки, PIV, разделение фаз, турбулентные пульсации.

### 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Взаимодействие капель и других видов дисперсных частиц с высокотурбулентным потоком газа носит сложный характер. Степень влияния частиц на поток зависит от их размера, массы, а также формы. Наиболее важным параметром, характеризующим взаимодействие частицы с потоком, является время ее динамической релаксации. Для стоксовой частицы оно равно

$$\tau_s = \frac{\rho_s d_s^2}{18\mu}.$$

Частицы с малым временем релаксации  $\tau_s \ll 1$  движутся вместе с потоком, практически не влияя на его характеристики. Такие частицы обычно используются в качестве трассеров в различных бесконтактных измерительных системах PIV, LDA, PTV (Particle Image Velocimeter, Laser Doppler Anemometer, Particle Tracking Velocimeter). Частицы с более высоким временем релаксации могут влиять на средние и пульсационные характеристики потока. В работах [1, 2] приводится обзор результатов по исследованию влияния дисперсной фазы на турбулентные

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 06-08-00967-а, 05-02-16281-а).

характеристики несущей среды. Отмечается, что частицы способны как подавлять турбулентность, так и усиливать ее. Проблема заключается в характере взаимодействия частиц с турбулентными вихрями. В последнее время был опубликован ряд статей по данному вопросу [3, 4], однако механизм взаимодействия дисперсной и несущей фазы остается до конца не выясненным.

Для исследования взаимодействия капель с турбулентной структурой течения несущего газа может быть весьма эффективным применение метода цифровой трассерной визуализации или PIV. Этот метод относится к классу бесконтактных методов измерения скорости в потоках. В ряду других инструментов для исследования структуры течений он занимает особое место благодаря возможности регистрировать мгновенные пространственные распределения скорости.

Полевые методы измерения скорости, в основе которых лежит измерение перемещений взвешенных в потоке мелких частиц (трассеров), применяются уже в течение нескольких десятилетий [5, 6]. Применявшаяся ранее ручная обработка данных была чрезвычайно трудоемкой, и за последние 15 лет прогресс в электронике, компьютерной и лазерной технике, а также в регистрирующей видеоаппаратуре позволил на базе традиционных развить новые методы количественной визуализации потоков и автоматизировать процесс измерения.

Методика измерения PIV в двухфазных течениях имеет ряд особенностей. Капли в потоке обладают, как правило, большой отражательной поверхностью, вследствие чего дают очень интенсивный сигнал. Это приводит к появлению сильного шума при расчёте корреляционной функции, по которой определяется скорость потока. К тому же скорость капель может существенно отличаться от скорости газа, а это означает, что корреляционная функция может иметь два и более максимумов. Поэтому к настоящему времени предложены различные способы, позволяющие разделить изображения фаз. Обзор этих способов приводится в работе [7].

Обычно разделение фаз производят по цвету, интенсивности, размеру изображения частицы, пространственной частоте, форме изображения частицы, свойствах пика получаемой корреляционной функции.

Разделение по цвету осуществляют путем добавления флуоресцентной краски в жидкость, из которой состоит дисперсная фаза или трассеры, с последующей съемкой двумя камерами через фильтры, при этом одна камера различает только трассеры, а другая дисперсную фазу. Иногда, для увеличения эффективности метода, добавляют две разные флуоресцентные краски в трассеры и капли.

Разделение по интенсивности происходит на основе более интенсивного отражения излучения от крупных частиц. Устанавливая порог интенсивности, можно отсеять наиболее крупные частицы, которые относятся к дисперсной фазе, и таким образом выделить трассеры. Аналогично производится разделение фаз по размерам изображения частиц, только в этом случае порог устанавливается для размеров световых пятен, которые соответствуют частицам в потоке газа или жидкости. При этом изображения трассеров должны быть намного меньше, чем изображения дисперсной фазы.

При умеренных объемных концентрациях дисперсной фазы, возможно разделение фаз по пространственной частоте с помощью медианных фильтров. В этом случае трассеры соответствуют высокочастотному шуму.

Анализируя форму изображения частиц и трассеров, также можно разделить фазы в случае, если отражение от частиц обладает некоторыми особенностями. Например, достаточно крупные прозрачные частицы могут давать два световых пятна на изображении: одно, соответствующее поверхности раздела, обращенной

к источнику излучения, и второе, соответствующее поверхности, противоположной этому источнику. Мелкие трассеры дают одно световое пятно. Тогда частица, принадлежащая дисперсной фазе, характеризуется двумя скоррелированными пиками интенсивности на изображении.

Разделение фаз на основе свойств корреляционной функции, используемой для получения значений скорости в PIV методе, возможно из анализа шумовой составляющей, вносимой дисперсной фазой. Анализ корреляционной функции является непростой задачей из-за большого количества факторов, влияющих на ее вид, однако обладая априорной информацией о свойствах дисперсной фазы (разная скорость газа и крупных частиц, особенности отражения от дисперсной фазы и т. д.), можно сформулировать критерии, с помощью которых удастся выделить составляющую, вносимую дисперсной фазой.

Все вышеперечисленные методы обладают своими достоинствами и недостатками, и применение того или иного способа разделения фаз зависит от конкретных условий эксперимента.

Целью настоящей работы является отработка методики измерения турбулентных характеристик двухфазных струй и исследование влияния дисперсной фазы на динамику газовой фазы свободной струи с использованием метода цифровой трассерной визуализации.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Струя создавалась с помощью дозвукового сопла диаметром 12,8 мм с плавно профилированными стенками и степенью сужения потока  $\sim 8$ . На выходе из сопла создавался равномерный профиль скорости со степенью турбулентности  $Tu \sim 0,3\%$ . При использовании 2D системы сопло располагалось вертикально и струя разрезалась лазерным ножом вдоль потока, а при 3D конфигурации оно располагалось горизонтально в направлении от регистрирующих камер. Установка снабжалась воздухом из магистрали высокого давления. Расход воздуха плавно регулировался вентилями и измерялся с помощью диафрагмы. Дополнительно скорость на срезе сопла измерялась трубкой Пито-Прандтля. Скорость воздуха изменялась в диапазоне

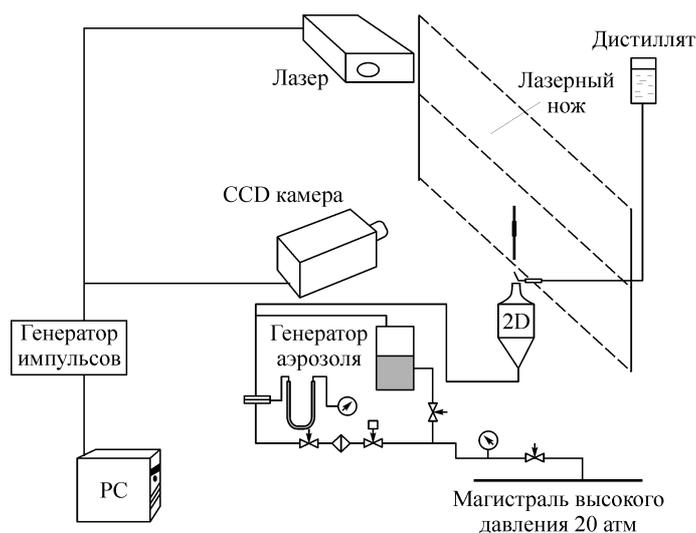


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

20–50 м/с, что соответствовало числам Рейнольдса  $Re = 1,7 \div 4,2 \times 10^4$ . Засев потока трассерами осуществлялся с помощью генератора аэрозоля глицерина конденсационного типа. Воздух из магистрали поступал в генератор, насыщался частицами аэрозоля и затем подмешивался к потоку, поступающему в сопло. Трассеры имели размер 3–8 мкм ( $\tau_s \sim (0,3 \div 2) \cdot 10^{-4}$  с). Для введения в поток второй фазы использовалась форсунка, расположенная на выходе из сопла и представляющая собой тонкую иглу диаметром 0,2 мм. Средний размер капель в экспериментах составлял 70–100 мкм ( $\tau_s \sim 0,02$  с). Массовая концентрация капель составляла  $M = 0,5$  %.

Измерения проводились на автотельном участке струи с помощью системы PIV. В качестве источника излучения использовался твердотельный импульсный Nd:YAG лазер с длительностью импульса 5 нс и максимальной энергией излучения 50 мДж. Для регистрации изображений применялась камера с матрицей 1360×1024 пикселей. Одна камера давала возможность получать двумерные поля скоростей (2D схема). Для получения трехмерных полей скорости (3D схема) использовались две одинаковые камеры. В этом случае производилась съемка одного участка течения с двух точек. Камеры располагались под углом к потоку и по полученным в один и тот же момент времени изображениям рассчитывались двумерные поля скоростей, затем по этим полям восстанавливалась третья компонента скорости.

Калибровка системы PIV в 2D варианте производилась путем помещения в область измерения предмета с известными геометрическими характеристиками, и по его изображению оценивался геометрический масштаб, соответствующий одному пикселю, который впоследствии использовался для расчета значения скорости по смещениям трассеров. В 3D варианте для калибровки системы использовалась специальная мишень. При измерениях в двухфазном потоке использовалась система PIV только в 2D варианте.

Разделение фаз при измерении полей скоростей в двухфазной струе производилось по интенсивности отраженного светового сигнала. Методика разделения была сходна с описанной в работе [3]. Оцифровка изображения давала массив данных, представляющих собой значения интенсивности, соответствующие каждому пикселю матрицы. Оптика настраивалась таким образом, чтобы интенсивность отраженного от капель сигнала существенно превышала сигнал от трассеров. Обработка осуществлялась с помощью программных пакетов. При обработке полученных изображений устанавливался порог интенсивности. Если пиксель имел интенсивность ниже пороговой, то ему присваивалось значение 0, если выше, то максимальное значение интенсивности. В результате получались бинарные изображения, на которых оставались пиксели, соответствующие каплям жидкости. Полученные изображения капель увеличивались в размере, затем переводились из бинарного в полутоновой вид и вычитались из исходного изображения. Увеличение размера изображений капель требовалось, чтобы нейтрализовать серый ореол (“корону”) вокруг капель. Значение пороговой интенсивности и степень увеличения изображений капель подбирались экспериментально. После операции вычитания образовывались области с нулевой интенсивностью, на которые накладывались маски с интенсивностью, соответствующей фону, что требовалось для корректной работы стандартной программы обработки изображений трассеров. Полученное в результате вычитания изображение содержало только трассеры, что позволяло, применяя стандартные алгоритмы, получать по ним поля скоростей газовой фазы двухфазного потока. Относительная погрешность метода, в наших условиях, не превышала 4 %.

### 3. ТЕСТОВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Использование методов цифровой трассерной визуализации для измерения скорости воздушной среды имеет ряд особенностей по сравнению с течением жидких сред. В первую очередь это касается выбора частиц, используемых в качестве трассеров. Частицы должны иметь малый размер (для обеспечения высокой разрешающей способности), достаточно высокую отражательную способность (для регистрации камерой) и малое время релаксации (для отслеживания потока). Частицы, обычно используемые для визуализации газовых потоков, не превышают единиц микрон. Как правило, в качестве трассеров в воздушной среде используют аэрозоли из водоглицериновой смеси.

Перед проведением основных экспериментов по исследованию двухфазных потоков была проведена серия тестовых опытов на автомодельном участке турбулентной однофазной затопленной струи. В качестве трассеров использовалась водоглицериновая смесь с добавлением раствора сухого молока. Добавление сухого молока делает частицы непрозрачными и увеличивает их отражательную способность.

На рис. 2 приведены результаты измерения профилей средней продольной скорости при использовании в качестве трассеров 50-процентной водоглицериновой смеси (см. рис. 2, *a*) и такой же смеси с добавлением раствора сухого молока (см. рис. 2, *b*). Видно, что во втором случае разброс данных существенно уменьшается.

Результаты измерения методом цифровой трассерной визуализации сравниваются с результатами, полученными термоанемометром на том же сопле, в сечении, располагавшемся на расстоянии 50 калибров от среза сопла, при одинаковых скоростях потока. Для измерений использовался термоанемометр DISA 55M10, интегрирующий цифровой вольтметр DISA 55D31, вольтметр среднеквадратичных значений DISA 55D35. Термоанемометр автоматизирован, получаемые данные

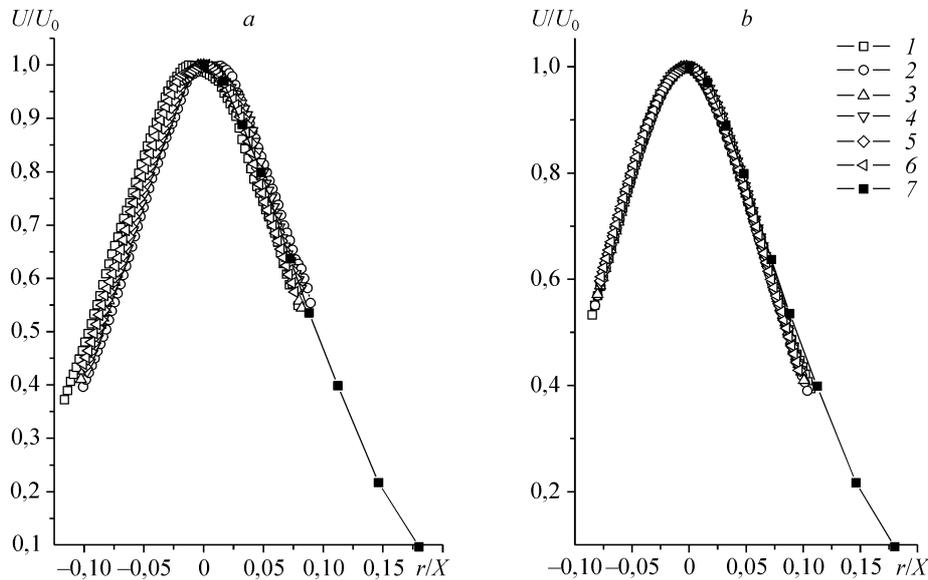


Рис. 2. Профили средней продольной скорости, измеренные PIV системой с использованием в качестве трассеров водоглицериновой смеси (*a*) и той же смеси с добавлением сухого молока (*b*);  $x/D = 20,9$  (1), 21,6 (2), 22,2 (3), 22,9 (4), 23,1 (5), 23,2 (6), термоанемометрические данные (7).

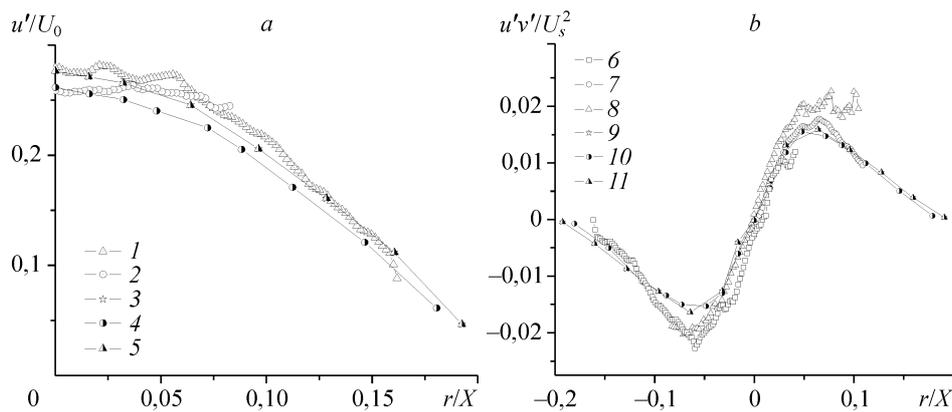


Рис. 3. Сопоставление пульсаций продольной компоненты скорости (а) и реинольдсовых напряжений (б), измеренных PIV системой, термоанемометром, и данных работ [9] и [10]: 3D профиль 45° (1), 2D профиль (2, 8), данные: термоанемометра (3, 9), работы [9] (4, 10), работы [10] (5, 11), 3D профиль  $u'v'/U_s^2$  (6), 3D профиль  $u'v'/U_s^2$  (7).

записывались на жесткий диск компьютера и впоследствии обрабатывались. При измерениях использовался двухниточный датчик DISA 55P62, с диаметром нити 5 мкм. Для обработки сигнала с двухниточного датчика использовалась оригинальная методика, описанная в [3].

Тестирование проводилось на автоматическом участке струи, на расстоянии 270–303 мм от среза сопла при 2D методе. ( $L/D = 21–23,3$ ). При использовании 3D методики расстояние от среза сопла составляло  $L/D = 22,2$  соответственно.

Профили продольных пульсаций и реинольдсовых напряжений, измеренные PIV системой, приведены на рис. 3. Как видно, профили пульсаций (см. рис. 3, а) и реинольдсовых напряжений (см. рис. 3, б) неплохо совпадают как с аналогичными профилями, измеренными термоанемометром, так и с классическими результатами [8, 9], полученными для автоматического участка затопленной струи. Причем лучшее совпадение как для нормальных, так и для двух ортогональных компонент касательных напряжений дает 3D метод. Таким образом, тестирование показало, что данная аппаратура позволяет с хорошей точностью исследовать средние и турбулентные характеристики газовых потоков.

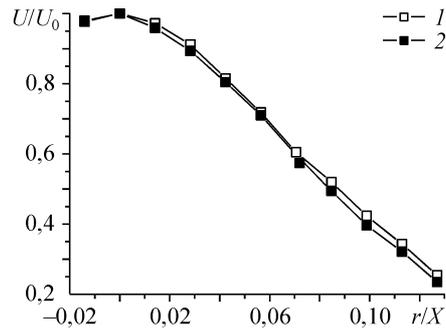
### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Считается, что капельная фаза в небольших концентрациях практически не оказывает влияния на поток. Большинство экспериментов по исследованию влияния дисперсной фазы на структуру течения проводилось при ее высоких концентрациях [11]. Малые концентрации так же представляют интерес, как для технических приложений так и для фундаментальных исследований, однако подробного изучения степени влияния малых концентраций на турбулентную структуру газовых потоков не проводилось.

Профили осевой компоненты скорости газа свободной струи при наличии в ней капель и без добавления дисперсной фазы представлены на рис. 4. Как видно, наличие капель в потоке практически не сказывается на распределении средних скоростей в осевом направлении.

Распределения пульсационной составляющей осевой и радиальной скоростей представлены на рис. 5. Результаты измерений показывают, что интенсивность пульсаций газовой фазы в двухфазной струе заметно снижается, особенно в осевой области.

Рис. 4. Профили средней скорости осевой компоненты газовой фазы струи в одно- и двухфазном режимах течения, газ (1), газ и капли (2).



Наиболее ошутимое подавление пульсаций наблюдается при анализе пульсационной компоненты радиальной составляющей скорости струи (см. рис. 5, *b*). Полученные данные согласуются с результатами работы [12], в которой проводится анализ влияния дисперсной фазы в затопленной струе на ее турбулентные характеристики. Отмечается, что наличие тяжелых частиц приводит к подавлению турбулентных пульсаций вследствие передачи части энергии турбулентных молей к инерционным частицам, вовлекаемым в движение. Степень подавления турбулентности зависит от плотности частиц, их массовой концентрации и начальной скорости. Перераспределение энергии между газовой фазой и дисперсной, в свою очередь, влияет на характеристики затопленной струи, в частности, вследствие подавления радиальной составляющей пульсаций изменяется угол раствора струи. Струя становится более узкой и дальнобойной.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что используемая методика разделения фаз позволяет вполне корректно измерять поля скоростей дисперсной и несущей составляющих двухфазных потоков, а также позволяют утверждать, что наличие крупных капель в потоке даже при незначительной концентрации влияет на распределения пульсаций скоростей газовой фазы. Настоящая работа является первым шагом в освоении методики цифровой трассерной визуализации применительно к двухфазным течениям. В дальнейшем эта работа будет продолжена в направлении получения корреляций между дисперсной и несущей фазами, а также получения более тонких статистических характеристик (рейнольдсовых напряжений, статистических моментов высших порядков, пространственных спектров), что позволит полнее раскрыть механизмы взаимодействия фаз в газокapельных потоках и перераспределения турбулентной энергии между фазами.

Авторы работы выражают признательность Леманову В.В. за предоставленные данные термоанемометрических измерений.

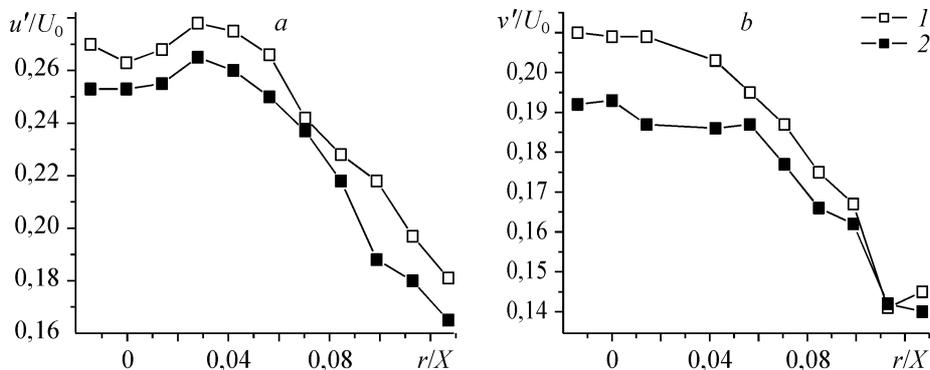


Рис. 5. Влияние дисперсной фазы на профили осевой (*a*) и радиальной (*b*) компонент пульсационной скорости газовой фазы двухфазной струи, газ (1), газ и капли (2).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Hetsrony G., Sokolov M.** Distribution of mass, velocity and intensity of turbulence in a two-phase turbulent jet // Trans. ASME J. Appl. Mech. — 1971. — Vol. 38. — P. 315–327.
2. **Hetsrony G.** Particle-turbulence interaction // Inter. J. of Mult. Flow. — 1989. — Vol. 15, No. 3. — P. 735–746.
3. **Sakakibara J., Wicker R.B., Eaton J.K.** Measurements of the particle-fluid velocity correlation and the extra dissipation in a round jet // Inter. J. of Mult. Flow. — 1996. — Vol. 22. — P. 863–881.
4. **Ferrand V., Bazile R., Bore'e J., Charnay G.** Gas-droplet turbulent velocity correlations and two-phase interaction in an axisymmetric jet laden with partly responsive droplets // Inter. J. of Mult. Flow. — 2003. — Vol. 29. — P. 195–217.
5. **Хабахпашева Е.М., Перепелица Б.В.** Поля скоростей и турбулентных пульсаций при малых добавках к воде высокомолекулярных веществ // Инженерно-физический журнал. — 1968. — Т. 14, № 4. — С. 598.
6. **Хабахпашева Е.М., Михайлова Е.С., Перепелица Б.В., Ефименко Г.И.** Экспериментальное исследование структуры пристенной турбулентности // Тр. XVIII Сибирского теплофиз. семинара. — Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 1975. — Т. 2. — С. 138–161.
7. **Khalitov D.A., Longmire E. K.** Simultaneous two-phase PIV two-parameter phase discrimination // Experiment in Fluids. — 2002. — Vol. 32. — P. 252–268.
8. **Леманов В.В., Мисюра С.А.** Измерения в двухмерном турбулентном потоке с помощью автоматизированного термоанемометра // Сиб. физ.-техн. журн. — 1991. — Вып. 3. — С. 112–115.
9. **Panchapakesan N.R., Lumley J.L.** Turbulence measurements in axisymmetric jets of air and helium. Pt. 1. Air jet // J. Fluid Mech. — 1993. — Vol. 246. — P. 197–223.
10. **Wyganski I., Fiedler H.** Some measurement in the self-pressing jet // J. of Fluid Mech. — 1969. — Vol. 38, No. 3. — P. 577–612.
11. **Мостафа А.А., Монджиа Х.Ц., МакДоннелл В.Г. и др.** Распространение запыленных струйных течений. Теоретическое и экспериментальное исследование // Аэрокосмическая техника. — 1990. — Т. 8, № 3. — С. 65–82.
12. **Абрамович Г.Н.** О влиянии примеси твердых частиц или капель на структуру турбулентной газовой струи // ДАН. — 1970. — Т. 190, № 5. — С. 1052–1055.

*Статья поступила в редакцию 11 марта 2008 г.*