

УДК 532.526

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ НА ВЫХОДЕ ИЗ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ДИФFUЗОРА С ВРАЩАЮЩЕЙСЯ СТЕНКОЙ

© 2012 Е. И. Куркин, А. В. Ивченко

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

С помощью PIV метода экспериментально исследовано течение на выходе из осесимметричного диффузора с вращающейся прозрачной стенкой и углом раскрытия 30° . Представлены поля скоростей при числах Рейнольдса от 9 000 до 44 000 и угловой скорости вращения от 0 до 3000 об/мин. Для описания нестационарности потока использован метод ортогональной декомпозиции (POD). Установлено, что осевое вращение диффузора может увеличивать равномерность протекающего потока, что может быть использовано для повышения газодинамической эффективности устройства.

Диффузор, эксперимент, осевое вращение, визуализация, PIV регистрация, POD метод, равномерность поля скоростей.

Отрыв потока в диффузоре – одна из основных причин снижения его эффективности. Это не позволяет использовать в энергомашиностроении диффузоры с углом раскрытия больше 6-8 градусов, что приводит к росту габаритов газодинамических установок.

Проведённое в [1] моделирование пограничного слоя в осесимметричном диффузоре показало возможность устранения отрыва потока путём закрутки

диффузора в осевом направлении (рис. 1).

Авторами проведено экспериментальное исследование влияния вращения стенки осесимметричного диффузора с углом раскрытия $2\theta_0 = 30^\circ$ на характеристики течения воздуха на его выходе. Схема эксперимента представлена на рис. 2, внешний вид установки – на рис. 3. Диаметр входа диффузора равен 50 мм, выхода – 150 мм.

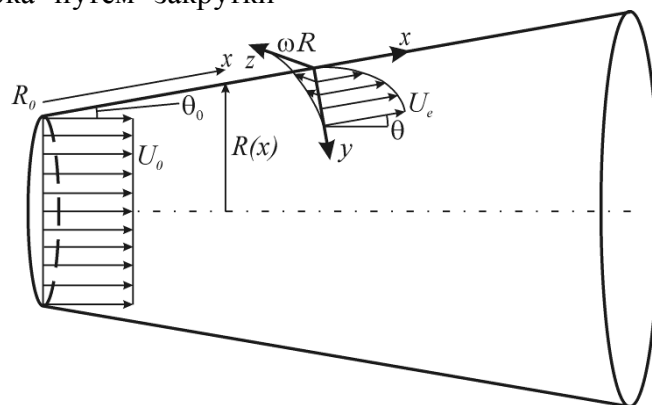


Рис. 1. Схема течения внутри осесимметричного канала

Вращение диффузора обеспечивается его консольной установкой на два шариковых однорядных подшипника, охватывающих сопло аэродинамической трубы на входе в диффузор. Вращение проводится асинхронным двигателем АИР 80 В2 мощностью 2,2 кВт, подключённым через преобразователь частоты Hitachi L100, и передаётся на установку вращения диффузора через клиноременную передачу. Максимальная

скорость вращения диффузора, достигнутая в результате эксперимента, составляет 3 000 об/мин. Исследования проведены на аэродинамической трубе малых скоростей Т-4 кафедры аэрогидродинамики СГАУ.

Основным методом исследования является PIV метод [2] измерения скорости потока по изображениям частиц, реализуемый на основе установки фирмы Dantec Dynamics. Для видеорегистрации изображений рассеивающих частиц аэрозоля в

потоке был использован диффузор с прозрачными стенками, изготовленный из оргстекла.

Съёмка PIV производилась при энергии импульса 30 мДж и ширине световой полосы 5-6 мм. Видеоряд отдельного эксперимента

формировался из 200 кадров, записанных с частотой 4 Гц. Обработка полученных изображений проведена методом кросс-корреляции при размерах окна опроса 64 x 64 pix.

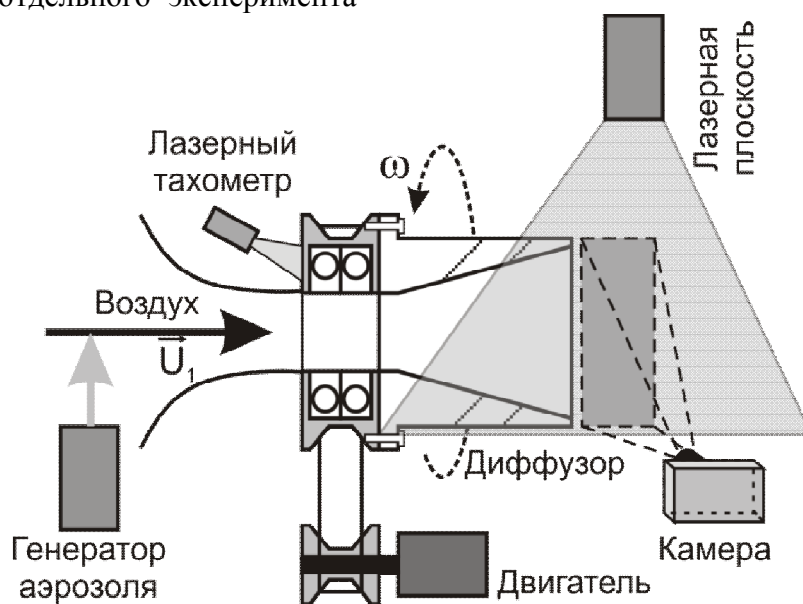


Рис. 2. Схема эксперимента

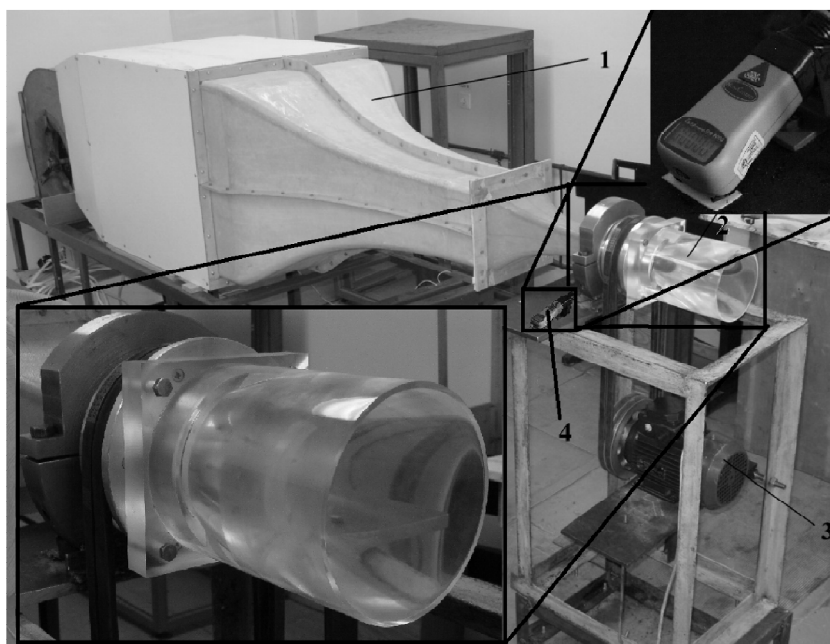


Рис. 3. Внешний вид установки

1- аэродинамическая труба, 2-диффузор, 3-электродвигатель, 4 – тахометр

Исследование потока было проведено при числах Рейнольдса

$$Re = \frac{U_1 d_1}{\nu} = 9 \cdot 10^3 \dots 44 \cdot 10^3, \text{ где } U_1 - \text{ скорость}$$

потока воздуха, d_1 - входной диаметр диффузора, ν - коэффициент кинематической вязкости. При описании результатов используется относительная скорость вращения Ω , равная отношению

скорости вращения стенки диффузора к скорости потока на его входе : $\Omega = \frac{\omega d_1}{2U_1}$.

Визуализация течения, полученная в ходе эксперимента, показана на рис. 4. Видно, что вращение диффузора приводит к расширению струи воздуха на его выходе. Среднее поле скорости, построенное по 200 PIV измерениям для каждого из случаев вращения диффузора, подтверждает

сделанный вывод (рис. 5). Единичный вектор, приведённый на векторных полях,

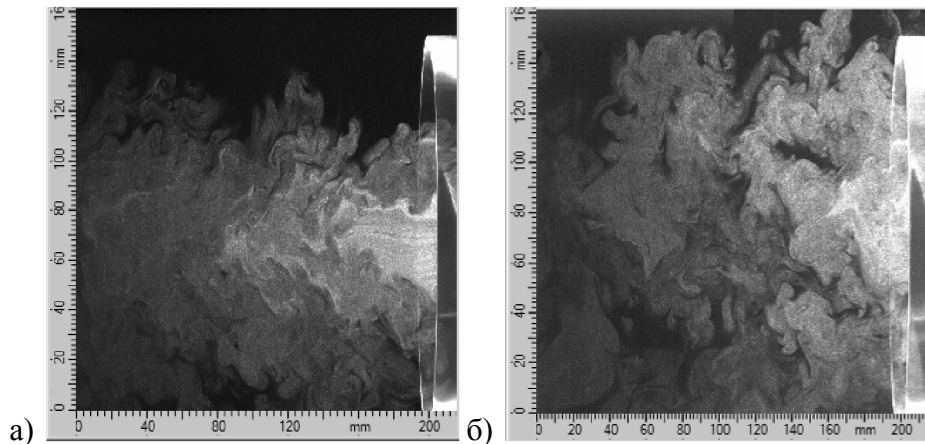


Рис. 4. Визуализация потока воздуха на выходе из вращающегося диффузора,

а) $\Omega = 0$, б) $\Omega = 0,2$, $Re_D = 9 \cdot 10^3$

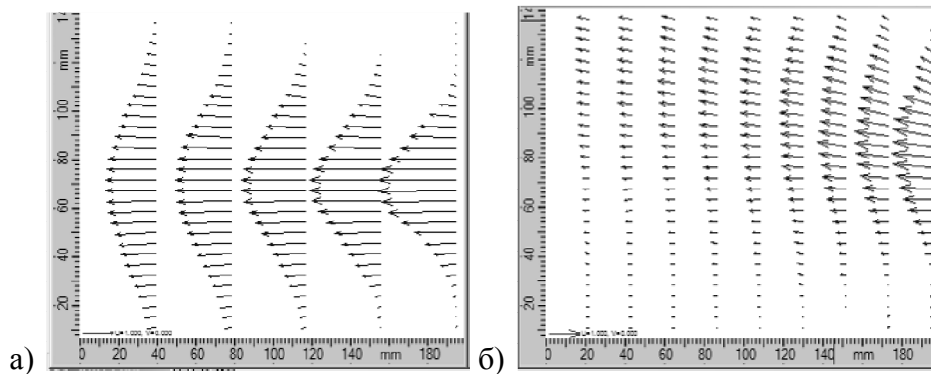


Рис. 5. Усредненное поле скоростей на выходе из вращающегося диффузора,

а) $\Omega = 0$, б) $\Omega = 0,2$, $Re_D = 9 \cdot 10^3$

Степень неравномерности потока оценивалась коэффициентом Буссинеска [3], равным отношению полного значения количества движения потока, проходящего через выбранное сечение диффузора, к количеству движения потока, оцененному по средней скорости в том же сечении:

$$M_K = \frac{K_{ist}}{K_{sred}} = \frac{1}{S_2} \int_{S_2} \left(\frac{u}{U_2} \right)^2 dS,$$

где u - скорость в точках выходного сечения, $U_2 = \frac{1}{S_2} \int u dS$ - средняя скорость

выходного сечения, S_2 - площадь выходного сечения.

Для исследования был выбран профиль скорости, находящийся на удалении 10 мм от среза диффузора. Значения коэффициента Буссинеска для различных режимов течения представлены на рис. 6. Для всех исследованных чисел Рейнольдса равномерность потока увеличивается при небольшой относительной скорости вращения $\Omega = 0,2$. Увеличение скорости вращения может приводить к росту неравномерности профиля скорости потока.

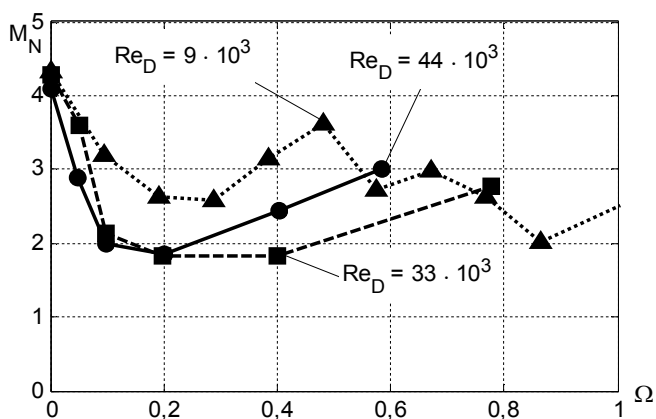


Рис. 6. Степень неравномерности потока (коэффициент Буссинеска), при разных числах Рейнольдса и скоростях вращения диффузора с углом раскрытия 30 градусов

При угле раскрытия 30 градусов поток воздуха отрывается от стенок диффузора, причём такой отрыв является нестационарным. Вращение диффузора может влиять на отрыв потока, но при всех исследованных относительных скоростях нестационарность потока сохраняется.

Для описания динамики движения потока был применён метод ортогональной декомпозиции (POD) [4]. Использование POD позволяет выделять основные формы (моды) колебаний нестационарного течения (рис. 7).

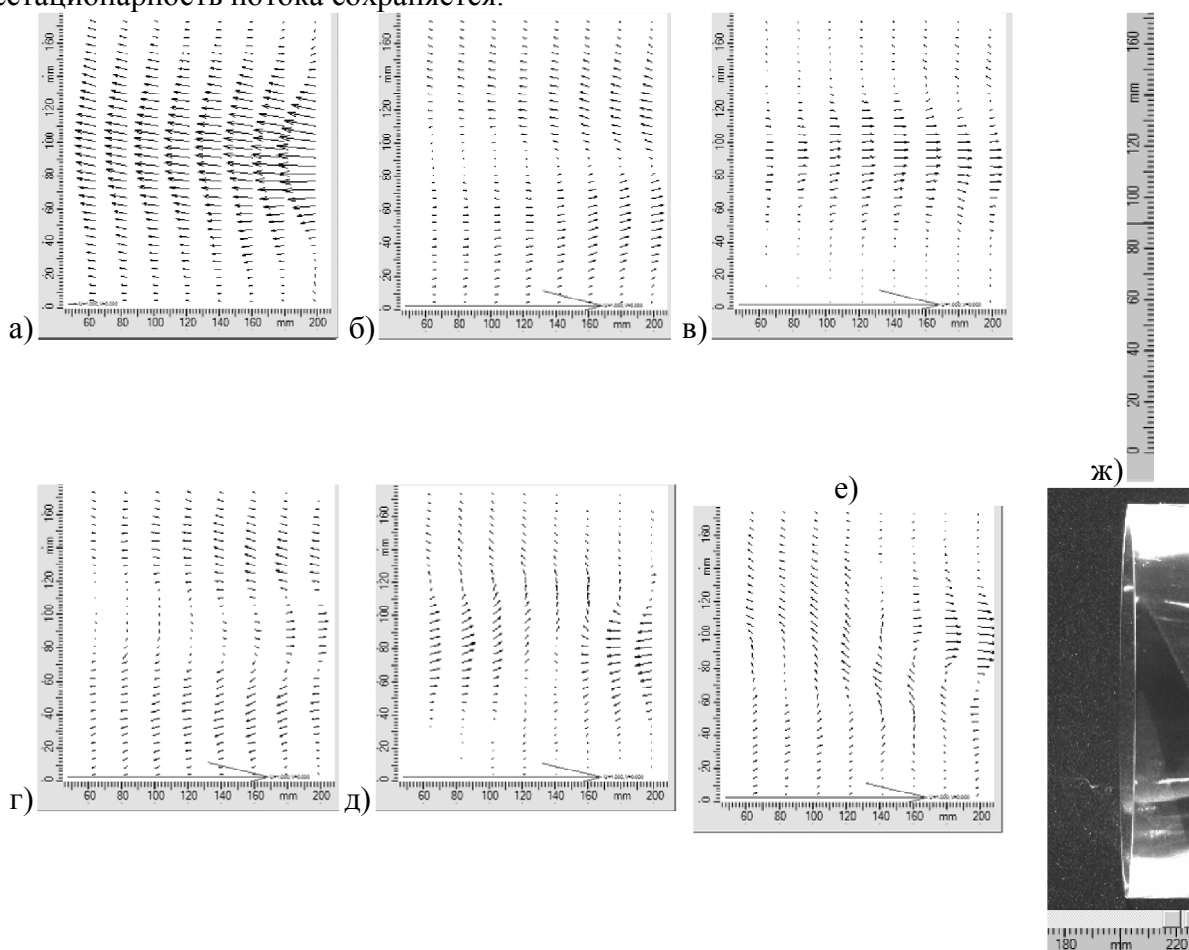


Рис. 7. POD моды потока, $Re_D = 44 \cdot 10^3$, $\Omega = 0, 2$,

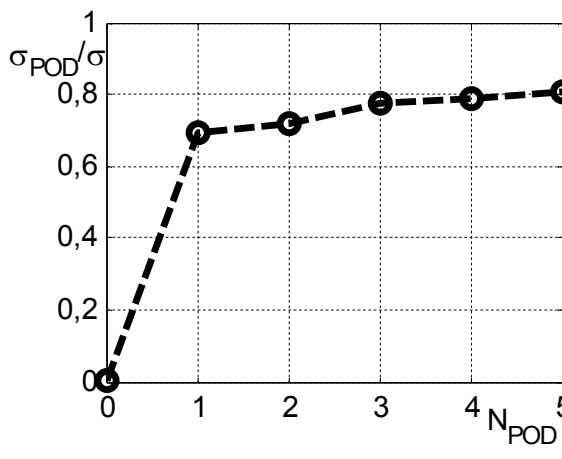
а) средний поток (мода 0), б)-е) – моды 1-5, ж) координаты установка диффузора

Рис. 7 показывает, что основная доля нестационарности потока (мода 1) заключается в асимметричном отклонении его ядра в сторону стенок диффузора

(вращение вместе со стенками). Остальные моды более детально описывают это отклонение.

Количество мод, достаточных для

описания нестационарного течения, оценивается по отношению среднеквадратичного отклонения потока, восстанавливаемого из ограниченного числа POD-мод, к среднеквадратичному отклонению экспериментально зарегистрированного потока (рис. 8). Видно, что основная (первая) мода даёт около 70% вклада в описание нестационарности.



а)

Рассматривая распределение нестационарности потока по профилю скорости, отметим, что моды со второй по пятую необходимы только для детализации процесса истечения в осевой области канала диффузора. Моды выше пятой уже не дают значительного вклада в суммарную картину потока и могут не учитываться при описании данного течения.

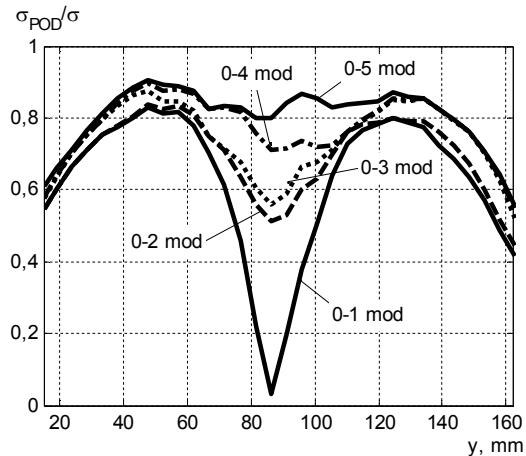


Рис. 8. Доля отклонений потока от среднего, описываемая POD модами, $Re_D = 44 \cdot 10^3$, $\Omega = 0,2$, профиль 10 мм от выхода из диффузора, а) усредненные по профилю значения, б) профиль $\sigma_{\text{POD}} / \sigma$

Проведённое экспериментальное исследование показало, что закрутка осесимметричного диффузора приводит к расширению потока воздуха на его выходе и может быть рассмотрена как метод снижения неравномерности потока воздуха на выходе из диффузоров с большим углом раскрытия и как метод повышения его эффективности. Повышение эффективности диффузоров с большим углом раскрытия позволяет расширить область их применения и может привести к уменьшению размеров газодинамических установок.

Работа выполнена при частичной поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013г.г.» (Проект П939), а также при поддержке Министерства образования и науки РФ, соглашение 14U01.21.8757 «Оптимизация теплозащитного покрытия надкалиберного головного обтекателя ракеты-носителя «Союз-2» путем уточнения основных характеристик обтекания ракеты-носителя потоком вязкого газа в условиях сплошной среды и течения со скольжением».

Библиографический список

1. Куркин, Е.И. Расчет пограничного слоя внутри осесимметричных каналов при их осевом вращении в системе MATLAB [Текст] / Е.И. Куркин, В.Г. Шахов // Труды IV всероссийской научной конференции «Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB», Астрахань: Изд. дом «Астраханский университет», 2009. С.186-201.
2. Бойко, В.М. Методы оптической диагностики в аэрофизическом эксперименте [Текст] / В.М. Бойко, А.М. Оришич, А.А. Павлов, В.В. Пикалов – Новосибирск: НГУ, 2009.-450с.
3. Идельчик, И.Е. Аэрогидродинамика технологических аппаратов [Текст] / И.Е. Идельчик - М.: Машиностроение, 1983. - 351 с.
4. Meyer Knud Erik, Cavar Dalibor, Pedersen Jakob. POD as tool for comparison of PIV and LES data // 7th International Symposium on Particle Image Velocimetry, Rome, Italy, 2007 - P. 1-12.

EXPERIMENTAL STUDY OF AIR FLOW IN AXISYMMETRIC DIFFUSER OUTPUT SECTION WITH ROTATING WALL

© 2012 E. I. Kurkin, A. V. Ivchenko

Samara State Aerospace University
named after academician S.P. Korolyov (National Research University)

The effect of axisymmetric diffuser wall rotation was experimental studied. Diffuser with an apex angle of 30 degrees was investigated by PIV method on Re number from 9 000 to 44 000 and the angular velocity from 0 to 3000 rpm. POD method was used for no stationary flow description. The study showed that rotating diffuser walls leads to expansion of the air flow at the output, and can be viewed as a method to increase their effectiveness.

Diffuser, experiment, PIV method, axisymmetric wall rotation. POD method, expansion, visualization, velocity field.

Информация об авторах

Куркин Евгений Игоревич, аспирант кафедры аэрогидродинамики, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: eugene.kurkin@mail.ru. Область научных интересов: вычислительная и экспериментальная аэрогидродинамика, математическое моделирование.

Ивченко Алексей Викторович, доцент кафедры производства двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: fgrrt@yandex.ru. Область научных интересов: физика газового разряда, оптические методы исследования потока.

Kurkin Evgeni Igorevich, post-graduate student of the aerohydrodynamics department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: eugene.kurkin@mail.ru. Area of research: Computation and experimental aerohydrodynamics, mathematical simulation.

Ivchenko Alexey Viktorovich, associated professor Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: fgrrt@yandex.ru. Area of research: Physics of gas discharge, optical methods for flow research.