

**УСТРАНЕНИЕ ОТРЫВА ПОТОКА В ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДИФFUЗОРАХ ПУТЁМ ИХ ОСЕВОГО ВРАЩЕНИЯ**

Пограничный слой отрывается от стенок диффузора под воздействием положительного градиента давления вдоль диффузора, возникающего вследствие падения скорости при увеличении поперечного сечения. Основная цель установки диффузоров – преобразование кинетической энергии потока в потенциальную с минимальными потерями полного давления. Поэтому эффективность диффузоров, коэффициент их полезного действия часто определяют отношением действительного прироста статического давления к идеальному приросту в отсутствии потерь. Вследствие отрыва поперечная площадь потока на выходе из диффузора становится меньше площади сечения канала [1]. Желание увеличить степень расширения диффузора для экономии пространства за счёт уменьшения его длины, при сохранении его прежней эффективности, приводит к необходимости решения задачи устранения отрыва потока на стенках диффузора.

Актуальным способом управления течением в диффузорах является закрутка потока. Изменение структуры течения в диффузорах в зависимости от угла закрутки потока на входе в канал было выявлено ещё в 1963 году в работе Липе [2]. В 2003 году Высотина [3] реализовала метод Годунова для более подробного анализа структуры закрученного течения в осесимметричных каналах. Сравнение результатов численного эксперимента [3] с физическим экспериментом [2] показало согласование результатов по расположению зон отрыва в диффузоре с углом раскрытия  $45^\circ$  в зависимости от изменения угла закрутки потока на входе. Высотина показала, что в диапазоне значений угла закрутки от  $0$  до  $30^\circ$  в выходном участке диффузора имеется зона отрыва, которая с увеличением угла закрутки преобразуется из открытой в закрытую. При больших углах закрутки в работе [3] выявлено устранение отрывной зоны и появление открытой зоны возвратно-циркуляционного течения. Причём отмечено, что с точки зрения восстановления давления лучшим по сравнению с незакрученным течением является вариант течения с углом закрутки на входе  $31^\circ$ .

Практическое использование закрутки потока на входе в диффузор газотурбинного двигателя изучалось в экспериментальных работах [4-8], в которых указывалось на наличие минимума потерь полного давления в диапазоне углов закрутки  $1^\circ$ - $15^\circ$ . Численное моделирование диффузора при различном положении стоек, установленных на его входе для закрутки потока, проведено Солодовым и Стародубцевым в про-

граммном комплексе MTF5 [9]. Рассматривая течение воздуха в диффузоре при числах Маха 0,01-0,03, авторы статьи [10] показали, что установка стоек под углом  $10^\circ$  к оси приводит к снижению потерь при натекании, близком к осевому, причём дальнейшее подворачивание потока не является эффективным.

Проведённый расчёт пограничного слоя внутри осесимметричных каналов при их осевом вращении основан на методе интегрирования уравнений с помощью конечно-разностной схемы «прямоугольник» [11, 12]. Дополнительно используется закон постоянства расхода

$$Q = 2\pi \int_0^R V_x r dr = \text{const.}$$

для любого сечения поперёк оси симметрии, что приводит к формуле для расчёта скорости на внешней границе пограничного слоя в виде

$$U_* = \left[ \frac{1}{2A} \left( -B + \sqrt{B^2 - 4AC} \right) \right]^2, \quad (1)$$

где  $A = \pi R^2$ ,  $B = 2\pi R \sqrt{ix} (f_j - \eta_j)$ ,  $C = 2\pi ix \left[ \frac{1}{2} \eta_j^2 - f_j \eta_j + F_j \right] - Q_0 \cdot \cos^{-1} \theta_0$ ,  $Q_0 = \pi R_0^2 U_0$ .

$x$  - координата канала вдоль его стенки,  $\eta = y \sqrt{Uv^{-1}x^{-1}}$  - переменная типа переменной Блазиуса,  $y$  - координата поперёк пограничного слоя,  $v$  - кинематическая вязкость среды,  $U_0$  - скорость потока на входе в канал,  $R = R(x)$  - радиус диффузора,  $R_0 = R(0)$ ,  $\theta_0$  - угол наклона стенок канала к оси симметрии (половина угла раскрытия),  $J$  - индекс величины на внешней границе потока,  $f$  такая, что  $V_x = U_* \frac{\partial f}{\partial \eta}$ ,  $F = \int f d\eta$ .

Значения коэффициентов в формуле (1) и сама скорость невязкого течения определяются в одном и том же слое по длине канала. Поэтому удовлетворение скорости  $U_*$  значению (1) происходит с помощью дополнительного итерационного цикла (рис. 1).

Расчёт турбулентного пограничного слоя проводился с помощью модифицированной авторами модели турбулентной вязкости Себиси-Смита. Реализация расчета внутреннего турбулентного течения показала высокую зависимость коэффициентов турбулентной вязкости от гладкости функции скорости невязкого течения (1). Прямое численное дифференцирование зависимости (1) приводит к колебаниям производной и неустойчивости турбулентного решения. Для устранения такой неустойчивости дифференцирование скорости невязкого течения (1) ведётся после предварительного сглаживания полиномом третьей степени, построенным на ряде точек текущего и преды-

дующих сечений методом наименьших квадратов. Точность и эффективность сглаживания подтверждается совпадением значений поверхностного напряжения трения при решении задачи с алгоритмом сглаживания и при решении прямой задачи с известным распределением скорости на внешней границе пограничного слоя [13].

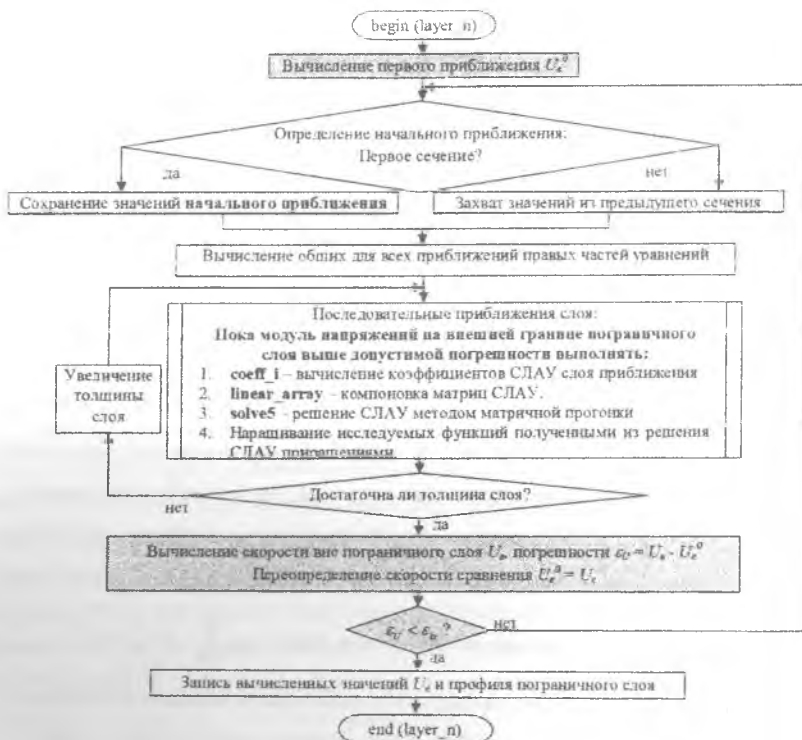


Рис. 1. Алгоритм процедуры расчёта поперечного потока сечения пограничного слоя в случае внутреннего течения

Программа расчёта пограничного слоя реализована в среде MATLAB 7.0 [13]. Тестирование программы производилось для случая ламинарного течения в прямой круглой трубе и диффузоре малого раскрытия. Получено соответствие решения с аналитическими результатами [14] и расчётами по методу контрольных объёмов в пакете ANSYS CFX [13].

Используя программу Vertel, исследуем течение воздуха внутри конического диффузора с углом раскрытия  $10^\circ$  при различных относительных скоростях  $\Omega$  его осевого вращения. Продольная проекция напряжения трения на стенке диффузора при

различных скоростях  $\Omega$  представлена на рис. 2. Напряжения трения на поверхности диффузора, вычисленные в программе Vertel при  $\Omega = 0$  и  $\Omega = 1$ , хорошо согласуются с результатами, полученными в ANSYS CFX. Близки и координаты точки отрыва потока, определённые в этих программах при  $\Omega = 0$ . Закругка конического диффузора вокруг оси симметрии приводит к увеличению напряжения трения на его стенках и смещению точки отрыва вниз по течению, причём при достижении скорости  $\Omega = 0,51$  отрыв потока устраняется.

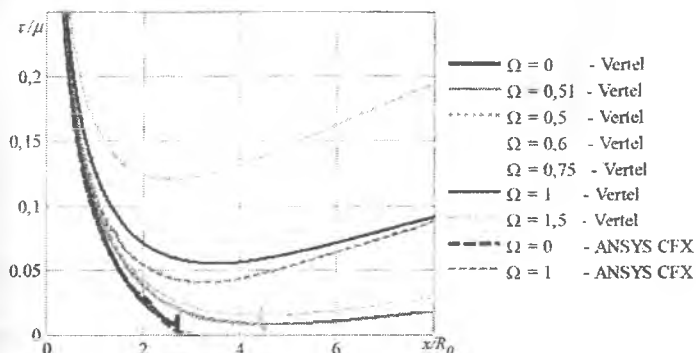


Рис. 2. Напряжение трения в осевом направлении на стенке вращающегося диффузора с углом раскрытия  $10^\circ$ ,  $Re = 2000$ , ламинарный режим течения

Построенные в ANSYS CFX поля осевой проекции скорости (рис. 3) подтверждают устранение отрыва потока при осевом вращении диффузора.

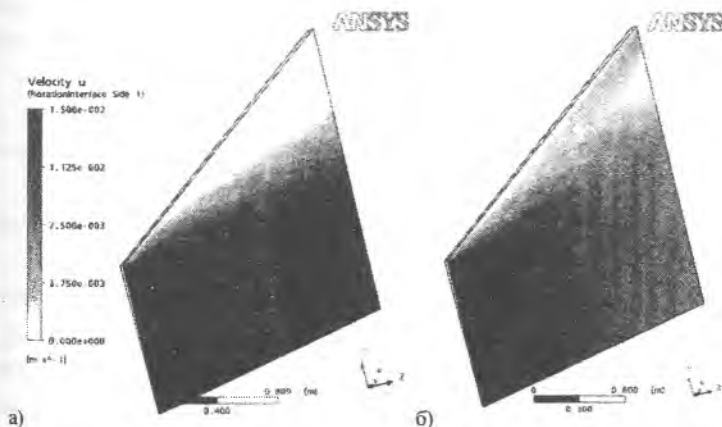


Рис. 3. Поле осевой проекции скорости при а)  $\Omega = 0$ , б)  $\Omega = 1$ .  $Re = 2000$ , ламинарный режим течения

Турбулентная модель течения даёт большие значение поверхностных напряжений трения и большие значение координаты  $x$  точки отрыва потока (рис. 4).

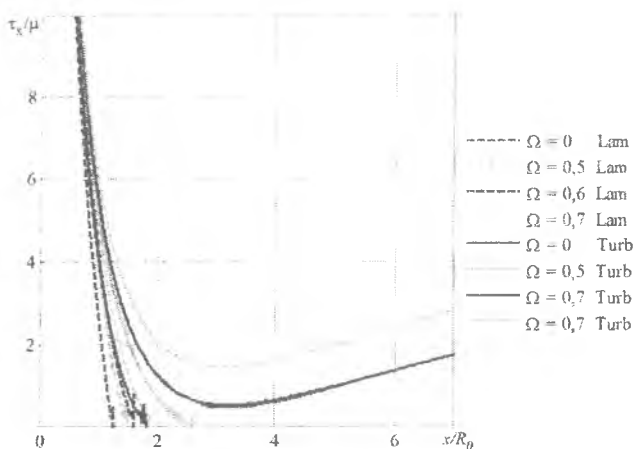


Рис. 4. Напряжения трения в осевом направлении на стенке диффузора при ламинарном и турбулентном потоке, угол раскрытия  $10^\circ$ ,  $Re = 40000$

Для устранения отрыва турбулентного потока требуются меньшие скорости вращения диффузора по сравнению с ламинарным случаем. К примеру, при  $Re = 40000$  при  $\Omega = 0,6$  и  $\Omega = 0,7$  турбулентное течение безотрывно, тогда как в ламинарном режиме происходит отрыв потока (рис. 4).

Таким образом, предложенный способ устранения отрыва потока в коническом диффузоре и повышения его эффективности опробован в ходе вычислительных экспериментов и показал свою хорошую работоспособность.

#### Библиографический список

1. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям [Текст]/И.Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
2. Liepe, F. Untersuchungen über das Verhalten von Drallströmungen in Kegeldiffusoren [Text]/F. Liepe// Maschinenbautechnik, Heft 3. – 1963. – №12. – S. 137-147.
3. Высотина, В.Г. Структура закрученного течения в осесимметричных каналах [Текст]/ В.Г. Высотина// Математическое моделирование. – 2003. – №1. – С. 69-77
4. Винник, И.Д. Некоторые результаты аэродинамического исследования выхлопного патрубка транспортного ГТД [Текст]/ И.Д. Винник, М.П. Уманский, В.А. Черников Энергомашиностроение. – 1959. – №4. – С. 6-11.
5. Шерстюк, А.Н. Радиально-осевые турбины малой мощности [Текст]/

- А.Н. Шерстюк, А.Е. Зарякин. – М.: Машиностроение, 1976. – 206 с.
6. Гоголев, И.Г. Аэродинамические характеристики ступеней и патрубков тепловых турбин [Текст]/ И.Г. Гоголев, А.М. Дроконов. – Брянск: Грани, 1995. – 257 с.
  7. Зарякин, А.Е. Выхлопные патрубки паровых и газовых турбин [Текст]/ А.Е. Зарякин, Б.И. Симонов. – М.: МЭИ, 2002. – 272 с.
  8. Пономарев, Н. Улучшение газодинамических характеристик входных и выходных устройств промышленных ГТУ [Текст]/ Н. Пономарев// Газотурбинные технологии. – 2000. – С. 16-19.
  9. Солодов, В.Г. Научно-прикладной программный комплекс MTFS® для расчёта трёхмерных вязких турбулентных течений жидкостей и газов в областях произвольной формы [Текст]/ В.Г. Солодов, Ю.В. Стародубцев. – Сертификат гос. регистрации авт. прав, УГААСП 16. 07. 2002, №5921.
  10. Солодов, В.Г. Особенности обтекания опорного венца кольцевого диффузора ГТД при входной закрутке потока [Текст]/ В.Г. Солодов, Ю.В. Стародубцев, Б.В. Исаков, В.Т. Федан// Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. – 2005. – №6. – С. 31-38.
  11. Куркин, Е.И. Турбулентный пограничный слой при осевом обтекании вращающегося осесимметричного тела [Текст]/ Е.И. Куркин, В.Г. Шахов// Сб.тр.ХIII Всерос. научн.-техн. семинара Управление движением и навигации летательных аппаратов. – Самара, 2007. – Часть II. – С. 32-38.
  12. Куркин, Е.И. Пограничный слой на вращающихся осесимметричных телах при их осевом обтекании [Текст]/ Е.И. Куркин, В.Г. Шахов// Вестник СПбГУ. Сер. 10. – 2008. – Вып. 4 – С. 38-49.
  13. Куркин, Е.И. Расчёт пограничного слоя внутри осесимметричных каналов при их осевом вращении в системе MATLAB [Текст]/ Е.И. Куркин, В.Г. Шахов// Материалы IV Всероссийской научной конференции «Просктирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB». – Астрахань: Изд. дом «Астраханский университет», 2009. – С. 186-201.
  14. Слезкин, Н.А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости [Текст]/ Н.А. Слезкин. – М.: Гос. изд. технико-теоретической литературы. 1955. – 520 с.