

УДК 621.452.3

## ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ В ДИФFUЗОРНЫХ КАНАЛАХ ПРОСТОЙ И СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

©2011 И. С. Давлетшин<sup>1</sup>, Б. Г. Мингазов<sup>1</sup>, В. Б. Явкин<sup>1</sup>, Б. А. Кесель<sup>2</sup>, Д. В. Воскобойников<sup>2</sup><sup>1</sup>Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева<sup>2</sup>ОАО КПП «Авиамотор», г. Казань

Проведен сравнительный анализ достоверности шести моделей турбулентности для расчета диффузорных каналов различной конфигурации, а также исследование влияния параметров расчетной сетки на результаты расчета. Рассматривается вопрос создания оптимальных расчетных моделей для различных стадий инженерных расчетов диффузорных каналов выхлопных устройств газотурбинных установок.

*Диффузор, выхлопное устройство, модель турбулентности, турбулентное течение, расчетная сетка.*

### Введение

Целью исследования является изучение степени достоверности получаемых данных при численном расчете течения в диффузорных каналах простой и сложной конфигурации различными моделями турбулентности. Рассматривается также вопрос создания оптимальных расчетных моделей для различных стадий инженерных расчетов диффузорных каналов выхлопных устройств (ВУ) газотурбинных установок (ГТУ).

Одним из направлений увеличения экономичности газотурбинных установок является повышение эффективности их ВУ. Диффузорные каналы используются в ВУ ГТУ для отвода потока в определенном направлении с минимальными потерями энергии в выпускном тракте и кинетической энергии выходящих газов. Они также играют большую роль и в других технических устройствах, например межтурбинных переходных каналах ГТД.

### Моделирование

Рассматривается течение в плоском несимметричном диффузоре, представленном на рис. 1. Моделируемая область показана на рис. 2 и состоит из входного участка (канала длиной  $110H$  и высотой  $H$ ), несимметричного диффузора длиной  $21H$  с углом раскрытия  $10^\circ$  и выходного участка (канала длиной  $56H$  и высотой  $4,7H$ ).

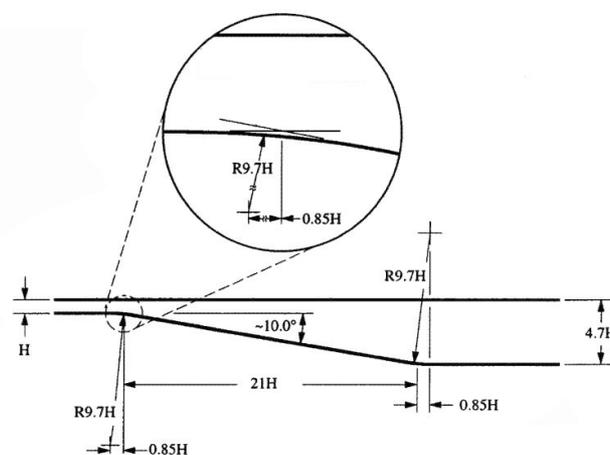


Рис. 1. Плоский несимметричный диффузор [1]

На входе организовано сформировавшееся турбулентное течение с  $Re=20\,000$ . Остальные особенности геометрии, характера течения и используемых средств измерения изложены в работе [1].

Для исследования выбраны следующие модели турбулентности (МТ):

- 1) стандартная  $k-\omega$  (skw);
- 2) SST  $k-\omega$  (sstkw);
- 3) Спаларта-Аллмареса (SA);
- 4) стандартная  $k-\epsilon$  (ske);
- 5) RNG  $k-\epsilon$  (rngke);
- 6) Realizable  $k-\epsilon$  (rke).

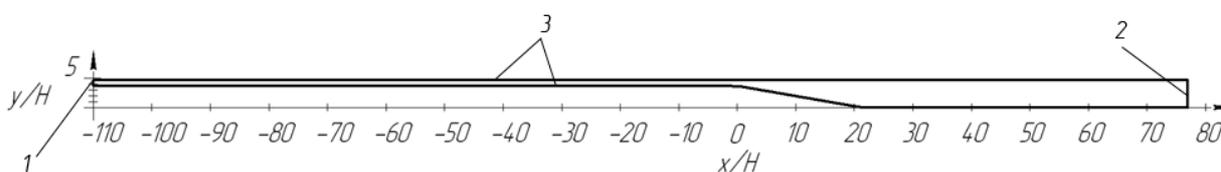


Рис. 2. Расчетная область:

1 - скорость на входе, 2 - давление на выходе, 3 - непроницаемая стенка

Расчет выполнен в программном комплексе вычислительной газовой динамики Fluent. Расчетные сетки. Для оценки расчетных сеток (РС) использовался параметр  $y^+$ :

$$y^+ = \frac{u_\tau y}{\nu},$$

где  $y$  – размер элемента в пристеночной области;  $\nu$  – кинематическая вязкость;  $u_\tau$  – динамическая скорость,  $u_\tau = \sqrt{\tau_w / \rho}$ .

Исходя из рекомендаций [2], для функции стенки и модели SA были выбраны расчетные сетки с  $y^+ \approx 0,5; 1; 10; 30; 50$ . Расчетные сетки представлены на рис. 3.

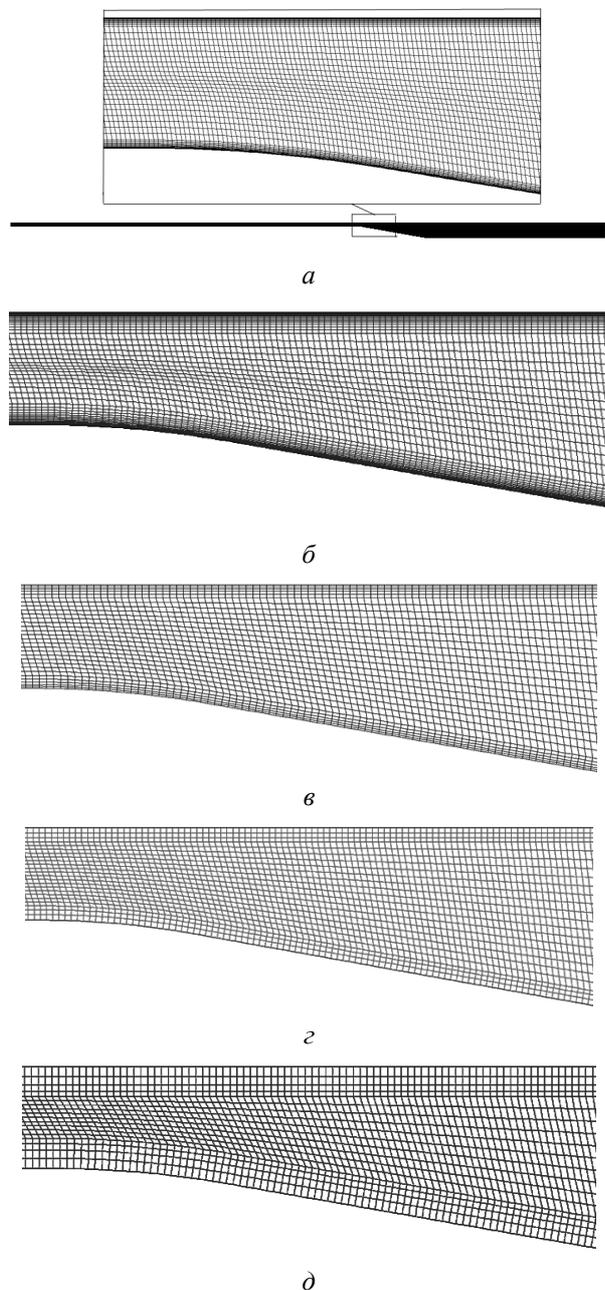


Рис. 3. Расчетные сетки:  
а)  $y^+ \approx 1$ ; б)  $y^+ \approx 0,5$ ; в)  $y^+ \approx 10$ ; г)  $y^+ \approx 30$ ; д)  $y^+ \approx 50$

В поставленной задаче используются следующие граничные условия:

- 1) скорость на входе в расчетную область;
- 2) давление на выходе;
- 3) непроницаемая стенка.

В пристеночной области используется пристеночная функция, а на самой стенке задано условие непротекания и прилипания.

Продольные и вертикальные размеры представлены в виде безразмерных величин  $x/H, y/H$ , где  $x, y$  – координаты,  $H$  – высота на входе в диффузор,  $H=15$  мм.

Полученные данные подтверждают, что семейство  $k-\varepsilon$  МТ не отражает реального характера течения, поэтому их не рекомендуется применять для расчета диффузорных течений.

Важным моментом при сравнении расчетных данных с экспериментальными является точность предсказания точки отрыва и присоединения потока. Более приоритетной, в нашем случае, является точность предсказания точки отрыва потока. Это связано с тем, что при проектировании диффузора ВУ, в первую очередь, необходимо обеспечить условие безотрывности потока. Незначительное смещение точки отрыва потока приводит к значительному искажению характера течения, например распределению поля давлений. Из эксперимента известно, что отрыв потока происходит при  $x=7H$ , а присоединение – при  $x=29H$ .

Расчеты показывают, что SA МТ и семейство  $k-w$  моделей предсказывают более раннюю точку отрыва по сравнению с экспериментальными данными. Skw модель предсказывает более раннюю точку отрыва и большую длину отрыва.

Сравнительный анализ данных показал, что для модели SA измельчение РС от  $y^+=50$  до  $y^+=0,5$  незначительно влияет на результаты расчетов.

На рис. 4 показано распределение коэффициента трения  $C_f$  вдоль нижней стенки диффузора для различных МТ с РС  $y^+ \approx 1$ . Данный коэффициент используется для определения точек отрыва и присоединения потока.

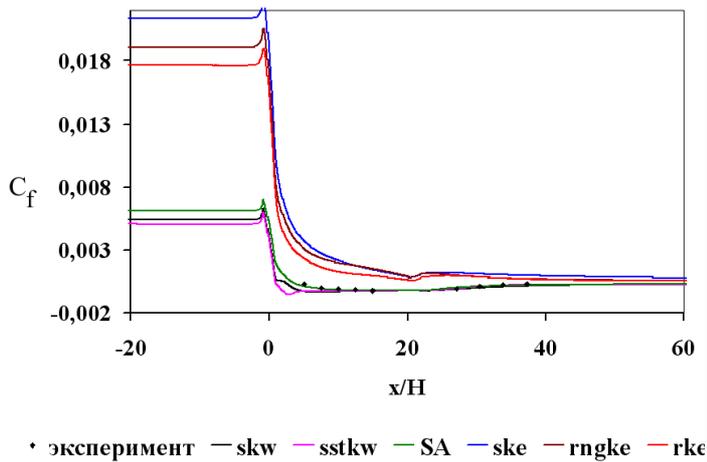


Рис. 4. Распределение  $C_f$  вдоль нижней стенки диффузора для различных МТ с  $PC y^+ \approx 1$ .

Рассматривается течение в диффузорном канале сложной конфигурации - ВУ стационарной ГТУ. 3D геометрическая модель выхлопного устройства представлена на рис. 5 и состоит из:

- 1) входного участка, необходимого для создания необходимого профиля скорости на входе в выхлопное устройство;
- 2) осерадиального диффузора (ОРД);
- 3) газосборника;
- 4) переходника;
- 5) выхлопного канала, обеспечивающего прямолинейность линий тока на выходе для корректности граничного условия «давление на выходе».

Учитывая симметричность выхлопного устройства относительно вертикальной плоскости, проходящей по оси осерадиального диффузора, 3D геометрическая модель выполнена в виде половины выхлопного устройства.

В поставленной задаче используются следующие граничные условия:

- 1) расход на входе в расчетную область;
- 2) давление на выходе;
- 3) непроницаемая стенка;
- 4) симметрия.

В пристеночной области используется пристеночная функция, а на самой стенке задано условие непротекания и прилипания. Семейство  $k-\varepsilon$  моделей турбулентности в расчетах не использовалось по вышеуказанным причинам.

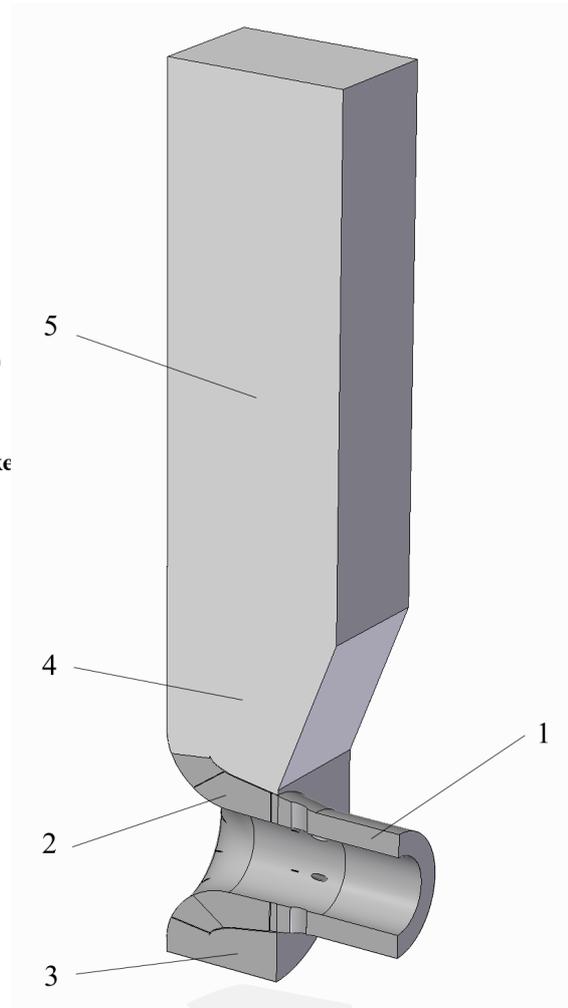


Рис. 5. Геометрическая модель выхлопного устройства ГТУ:

- 1 - входной участок, 2 - ОРД, 3 - газосборник, 4 - переходник, 5 - выхлопной канал

В настоящее время сформировалась типовая схема оптимального профилирования, которая предполагает проведение многовариантных расчетов с использованием моделей элементов проточной части, с построением расчетных сеток. В зависимости от постановки задачи оптимизации, количества учитываемых факторов и времени, требуемого на получение решения, используются модели различной степени сложности.

Для оценки степени адекватности расчетной модели выхлопного устройства было проведено сравнение результатов расчета с экспериментальными данными. Сравнительный анализ расчетного распределения полного давления с данными испытаний свидетельствует об адекватности рассмотренных МТ. Расчет показал наличие области отрыв-

ного течения на внутренней стенке осерадиального диффузора.

При инженерных расчетах использование модели турбулентности SA представляется эффективным решением на стадиях определения геометрии и компоновки разрабатываемой выхлопной системы.

Наиболее важным является параметризация объекта оптимизации, т.к. от этого во многом зависит полезность получаемого решения и скорость поиска экстремума. Для этого необходимо создание специальных блоков параметризации.

При решении оптимизационных задач для диффузорных каналов сложной конфигурации эффективно использование анализа чувствительности. Анализ чувствительности заключается в определении степени влияния изменения независимых переменных в заданной точке на изменение целевой функции. При поиске экстремума стремятся двигаться в направлении, обеспечивающем наибольшее увеличение (уменьшение) целевой функции. Этот подход широко используется в градиентных методах поиска, где очередное направление поиска оценивается численным дифференцированием целевой функции. При решении вариационных задач, где в качестве ограничений присутствуют дифференциальные уравнения в частных производных (например, уравнения На-

вье-Стокса), применяются оптимизационные схемы, основанные на решении уравнений чувствительности, которые выводятся аналитически для используемых уравнений и решаются численно теми же методами, что и уравнения модели [3].

Очевидно, что в задачах оптимизации (особенно многокритериальной оптимизации) с точки зрения эффективности отыскания оптимального решения выгодно использовать упрощенные математические модели. Для создания упрощенных моделей, обеспечивающих адекватность исследуемому объекту, требуется привлечение многолетнего опыта специалистов в исследуемой области.

### **Библиографический список**

1. Buice, C.U. and Eaton, J.K. Experimental investigation of flow through an asymmetric plane diffuser. Report No. TSD-107. Thermosciences Division, Department of Mechanical Engineering, Stanford University, Stanford, CA, USA. August, 1997.
2. FLUENT user's guide. - Fluent Inc., 2001.
3. Newman, J.C., Taylor, A.C. Three-Dimensional Aerodynamic Shape Sensitivity Analysis and Design Optimization Using the Euler Equations on Unstructured Grids, AIAA Paper 96-2464, June 1996.

## **SIMULATION OF TURBULENT FLOW IN SIMPLE AND COMPLEX DIFFUSER CHANNELS**

©2011 I. S. Davletshin<sup>1</sup>, B. G. Mingazov<sup>1</sup>, V. B. Yavkin<sup>1</sup>, B. A. Kesel<sup>2</sup>, D. V. Voskoboynikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kazan state technical university named after A.N. Tupolev  
<sup>2</sup>JSC Design and Production Enterprise «Aviamotor», Kazan

This paper presents a comparative study of six turbulence models for calculating the diffuser channels of different configurations, and also study of influence of parameters of computational grid on calculation results. The simulations was carried out on six grids with different spacing for the near wall points and different resolutions. The performance of six different turbulence models is compared with experimental results obtained at «Aviamotor» and other published experimental results. Creation of optimal models for different stages of engineering calculations of exhaust systems is considered.

*Diffuser, exhaust system, turbulence model, turbulent flow, computational grid.*

**Информация об авторах**

**Давлетшин Ильдар Салихзянович**, аспирант Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева, инженер-конструктор ОАО КПП «Авиамотор». E-mail: [ldavletshin@mail.ru](mailto:ldavletshin@mail.ru). Область научных интересов: газодинамика выхлопных устройств газотурбинных установок.

**Мингазов Биал Галавтдинович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. Тел.: (843)238-44-20. Область научных интересов: камеры сгорания газотурбинных двигателей.

**Явкин Владимир Борисович**, кандидат технических наук, доцент Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. Тел.: (843)238-44-20. Область научных интересов: газодинамика энергетических установок и двигателей, вычислительная гидромеханика.

**Кесель Борис Александрович**, заместитель главного конструктора по перспективным разработкам ОАО КПП «Авиамотор». Тел.: (843)571-97-05 доб. 2-03. Область научных интересов: технологические системы жизнеобеспечения газотурбинных установок с конвертируемыми ГТД.

**Воскобойников Дмитрий Владимирович**, начальник отдела проектирования ГТУ и НО ОАО КПП «Авиамотор». Тел.: (843)571-97-05 доб. 2-03. E-mail: [opora@aviamotor.ru](mailto:opora@aviamotor.ru). Область научных интересов: проектирование и газодинамика газотурбинных установок.

**Davletshin Ildar Salihzyanovich**, post-graduate student of Kazan state technical university named after A.N. Tupolev, design engineer of JSC Design and Production Enterprise «Aviamotor». E-mail: [ldavletshin@mail.ru](mailto:ldavletshin@mail.ru). Area of research: gas dynamics of exhaust system of gas turbine units.

**Mingazov Bilal Galavtdinovich**, Doctor of Engineering science, professor, the head of АЕЕР department of Kazan state technical university named after A.N. Tupolev. Phone: (843)238-44-20. Area of research: combustion chambers of gas turbine engines.

**Yavkin Vladimir Borisovich**, Candidate of Engineering science, associate professor of Kazan state technical university named after A.N. Tupolev. Phone: (843)238-44-20. Area of research: gas dynamics of powerplants and engines, computational hydrodynamics.

**Kesel Boris Alexandrovich**, perspective developing deputy chief designer of JSC Design and Production Enterprise «Aviamotor». Phone: (843)571-97-05 additional 2-03. Area of research: technological support systems of gas turbine powerplants with aeroderivative gas turbine engines.

**Voskoboynickov Dmitry Vladimirovich**, the head of GTP designing department of JSC Design and Production Enterprise «Aviamotor». Phone: (843)571-97-05 additional 2-10. E-mail: [opora@aviamotor.ru](mailto:opora@aviamotor.ru). Area of research: design and gas dynamics of gas turbine units.