

A. M. Молчанов

Московский авиационный институт, Россия, Москва

## МОДЕЛЬ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ДЛЯ РАСЧЕТА ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПОТОКОВ ПЕРЕМЕННОГО СОСТАВА

*Предложена алгебраическая модель для напряжений Рейнольдса (ARSM) и турбулентных потоков энергии и массы. Учет сжимаемости основан на специальном моделировании «быстрой» части корреляции пульсаций давления и скоростей деформаций в зависимости от градиентного числа Маха. Модель учитывает переменность турбулентных чисел Прандтля и Шмидта, для определения которых решаются специальные уравнения.*

Известно, что сжимаемость оказывает стабилизирующее воздействие на турбулентность, уменьшая с ростом скорости интенсивность турбулентного смещения. Предполагается, что влияние пульсаций давления на развитие турбулентности связано с «быстрой» частью корреляции пульсаций давления и скоростей деформации, которая в сжимаемых потоках ведет себя совершенно иначе, чем в несжимаемых. Для этой корреляции используются результаты прямого численного моделирования (DNS), полученные в работе [1].

Для получения алгебраических формул для напряжений Рейнольдса и турбулентных потоков применяется следующая гипотеза: конвекция и диффузия в уравнениях переноса диагональных элементов тензора напряжений Рейнольдса ведут себя подобно соответствующим членам в уравнении переноса турбулентной кинетической энергии  $K$ . Для недиагональных элементов и для турбулентных потоков массы и энергии считаем, что конвекция и диффузия находятся в балансе.

В результате получается следующее соотношение для турбулентной вязкости:

$$\mu_T = \frac{(1 - C_{\Pi_1} C_2 - C_{\Pi_2})}{C_1} \frac{K}{\rho \epsilon} X,$$

где  $X$  определяется через квадратное уравнение

$$(1 - C_{\Pi_2}) \alpha X^2 + \left[ (C_1 - 1) \rho \epsilon - \frac{2}{3} C_{\Pi_1} C_2 \alpha K \right] X - \frac{2}{3} K (C_1 - 1) \rho \epsilon = 0;$$

$$\alpha = \rho \frac{(1 - C_{\Pi_1} C_2 - C_{\Pi_2})}{C_1} \frac{K}{\epsilon} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right),$$

$$C_1 = 1,8, \quad C_2 = 0,6,$$

где  $C_{\Pi_1}, C_{\Pi_2}$  – специальные функции градиентного числа Маха, полученные на основе DNS [1].

Для учета переменности турбулентных чисел Прандтля и Шмидта к основной системе уравнений добавлены 4 дополнительных уравнения: для среднеквадратичной пульсации термодинамической энталпии и суммы среднеквадратичных пульсаций концентраций компонентов, а также для их скоростей диссипаций [2].

На рис. 1, 2 представлены некоторые результаты расчетов с использованием предложенной модели и их сопоставление с экспериментальными данными.

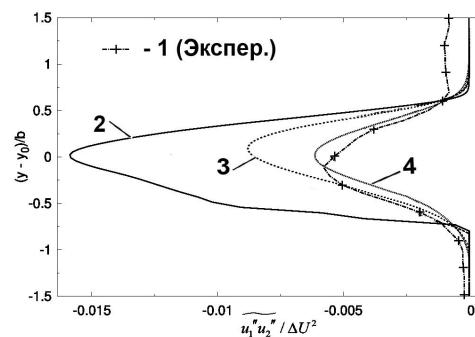


Рис. 1. Поперечный профиль сдвигового напряжения в слое смещения сверхзвуковых потоков:

1 – эксперимент [3]; 2 – расчет с использованием стандартной  $k\epsilon$ -модели турбулентности; 3 – расчет с использованием  $k\epsilon$ -модели турбулентности с поправкой на сжимаемость [4]; 4 – расчет с использованием модели данной работы

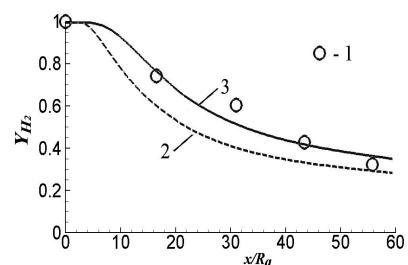


Рис. 2. Изменение концентрации водорода вдоль оси горячей струи в известном эксперименте Эванса [5]:

1 – эксперимент; 2 – расчет с постоянными значениями турбулентных чисел Прандтля и Шмидта; 3 – расчет с переменными значениями турбулентных чисел Прандтля и Шмидта

### Библиографические ссылки

1. Gomez C. A., Girimaji S. S. Algebraic Reynolds Stress Model (ARSM) for Compressible Shear Flows // AIAA Paper 2011-3572. 2011.
2. Molchanov A. M. Numerical Simulation of Supersonic Chemically Reacting Turbulent Jets // AIAA Paper 2011-3211. 2011.
3. Goebel S. G. and Dutton J. C. Experimental study of compressible turbulent mixing layers // AIAA Journal. 1991. Vol. 29. № 4. P. 538–546.

4. Молчанов А. М. Расчет сверхзвуковых неизобарических струй с поправками на сжимаемость в модели турбулентности // Вестник Моск. авиац. ин-та. 2009. Т. 16. № 1. С. 38–48.
5. Evans J. S., Schexnayder C. J., Beach H. J. Application of a Two-Dimensional Parabolic Computer Program to Prediction of Turbulent Reacting Flows // NASA Technical Report NASA TP 1169. 1978.

*A. M. Molchanov*

Moscow Aviation Institute, Russia, Moscow

## TURBULENCE MODEL FOR HIGH-SPEED VARIABLE COMPOSITION FLOWS

*An algebraic Reynolds stress model (ARSM) for high-speed compressible flows is developed. The incorporation of compressibility effects is based on special modeling of a rapid pressure-strain correlation. A model for variable turbulent Prandtl and Schmidt numbers is presented based on the special equations approach.*

© Молчанов А. М., 2011

УДК 621.313.322

*Д. И. Морозов, Е. В. Карпенко, К. С. Федий*

Сибирский федеральный университет, Россия, Красноярск

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ СИЛЫ МАГНИТНОГО ТЯЖЕНИЯ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ТОРЦЕВОГО ГЕНЕРАТОРА

*Проведено исследование сил тяжения между ротором и статором на экспериментальном стенде. Показаны возможности и необходимость применения программного комплекса ANSYS при разработке торцевых машин переменного тока, проведено исследование магнитных полей в различных режимах их работы. Представлены некоторые из полученных результатов моделирования.*

При работе торцевой электрической машины как в режиме нагружения, так и при холостом ходе, между статором и ротором возникают электромагнитные силы, которые оказывают существенное влияние на работу всей машины в целом [1].

Магнитная индукция в воздушном зазоре между статором и ротором линейно зависит от величины зазора, который задается во входном потоке модели электромагнитного взаимодействия торцевой машины. Фактически воздушный зазор в реальной машине непостоянный, вследствие неизбежных погрешностей изготовления деталей и сборочных единиц. Он представляет собой функцию координаты, отсчитываемой вдоль окружности средней линии магнитов.

Вследствие этого, сила электромагнитного тяжения, связанная с зазором обратной зависимостью, также непостоянна. Неравномерность распределения силы приводит к увеличению перекоса диска ротора, усилинию вибрации, что в свою очередь уменьшает ресурс подшипников и КПД всей машины, приводит к увеличению уровня шума при ее работе.

В межфакультетской лаборатории ПИ СФУ создана электромагнитная модель низкоскоростного торцевого синхронного генератора (НТСГ). В физическом эксперименте ставилась задача проверки достоверности силовых параметров, рассчитанных с использованием этой электромагнитной модели, в режимах нагружения и холостого хода. Испытывался трехфазный синхронный генератор мощностью 1 кВт.

Эксперимент проводился при величине воздушного зазора 1,0 м. Для повышения достоверности результатов измерения эксперимент повторялся несколько раз при одинаковом зазоре, но разных режимах подачи усилия на ротор: в режиме ступенчатого увеличения силы, плавного ее возрастания и резкого отрыва ротора

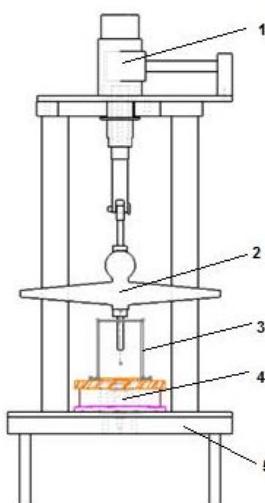


Рис. 1. Экспериментальный стенд

Для решения задачи электромагнитного преобразования энергии в двигателе была разработана чис-