

УДК 621.44.533.697

В.М. ЛАПОТКО, Ю.П. КУХТИН*Государственное предприятие «Ивченко-Прогресс», Украина***ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ ГАЗА
ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ОБТЕКАНИИ КРУГОВОГО ЦИЛИНДРА**

Используя эйлерово-лагранжев подход к решению уравнений газовой динамики и двухпараметрическую модель турбулентности, показана возможность моделирования нестационарного срывного обтекания кругового цилиндра с образованием периодических структур течения наподобие дорожки Кармана. Имеется хорошее соответствие экспериментальным данным распределения давления по обводу цилиндра, а также структуры скорости в спутном следе

поперечное обтекание кругового цилиндра, эйлерово-лагранжев подход, двухпараметрическая модель турбулентности, спутный след, дорожка Кармана

Введение

Моделирование нестационарных отрывных течений – одна из наиболее актуальных задач газовой динамики. Причина этого состоит в сложной динамике следа, оказывающего сильное влияние на динамические и тепловые характеристики решеток турбомашин при их нестационарном взаимодействии.

Задача отрывного обтекания цилиндра, в виду ее тщательной экспериментальной изученности, представляет большой интерес при апробации математического аппарата численного моделирования таких явлений.

Основная цель настоящей работы заключается в том, что бы оценить возможности использования математического аппарата [1] для моделирования срывного обтекания лопаток турбомашин.

**1. Численный метод
и модель турбулентности**

В основу используемого метода [1] положен эйлерово-лагранжев подход численного интегрирования уравнений законов сохранения массы, импульса и энергии. Отличительной особенностью метода является использование подвижных лагранжевых сеток, что исключает мазание параметров потока в областях нестационарности течения.

Срывные течения, являясь по своей природе нестационарными, характеризуются высокой степенью турбулентности. Для моделирования таких течений была использована двухпараметрическая модель турбулентности [2], являющаяся аналогом известной (к-ε) модели турбулентности Лаундера:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_{V(t)} \rho k_T dV = & - \int_{A(t)} \rho k_T (W - W_b) \cdot \bar{n} dA - \int_{A(t)} \delta_k dA - \int_{V(t)} \rho \varepsilon dV + C_{Gk} \int_{A(t)} \left(|\delta_{W_\varphi} W_\varphi| + |\delta_{W_m} W_m| \right) dA; \\ \frac{\partial}{\partial t} \int_{V(t)} \rho \varepsilon dV = & - \int_{A(t)} \rho \varepsilon (W - W_b) \cdot \bar{n} dA - \int_{A(t)} \delta_\varepsilon dA - C_{D\varepsilon} \int_{V(t)} \frac{\varepsilon^2}{k_T} \rho dV + \\ & + C_{G\varepsilon} \int_{A(t)} \left(|\delta_{W_\varphi} W_\varphi| + |\delta_{W_m} W_m| \right) \frac{\varepsilon}{k_T} dA; \\ \varepsilon = & k_T^{3/2} / \ell_T, \quad v_T = C_v k_T^2 / \varepsilon, \end{aligned} \quad (1)$$

где C_{Gk} , $C_{G\varepsilon}$, $C_{D\varepsilon}$, C_v – эмпирические коэффициенты. В используемой модели явления тепломассообмена

имитировались источниками и стоками массы импульса и энергии; δ_k – источник/сток отвечающий за

диффузию параметра k_T ; δ_ε – источник/сток отвечающий за диффузию параметра ε . Интенсивности источников и стоков определялись исходя из основных достижений молекулярно-кинетической теории газов и современной теории турбулентности [2].

2. Результаты численного моделирования

Предметом моделирования являлось поле течения газа, образующегося при поперечном обтекании

кругового цилиндра, для сверхкритического числа $Re = 1 \cdot 10^5$.

Условия обтекания и некоторые экспериментальные материалы заимствованы из работы [3].

На рис. 1 показано мгновенное поле течения, образующееся вблизи поверхности цилиндра и в дальнейшем поле следа.

Для сравнения на рис. 1, д показана мгновенная картина течения, полученная экспериментально при близких к расчетным условиям натекания [4].

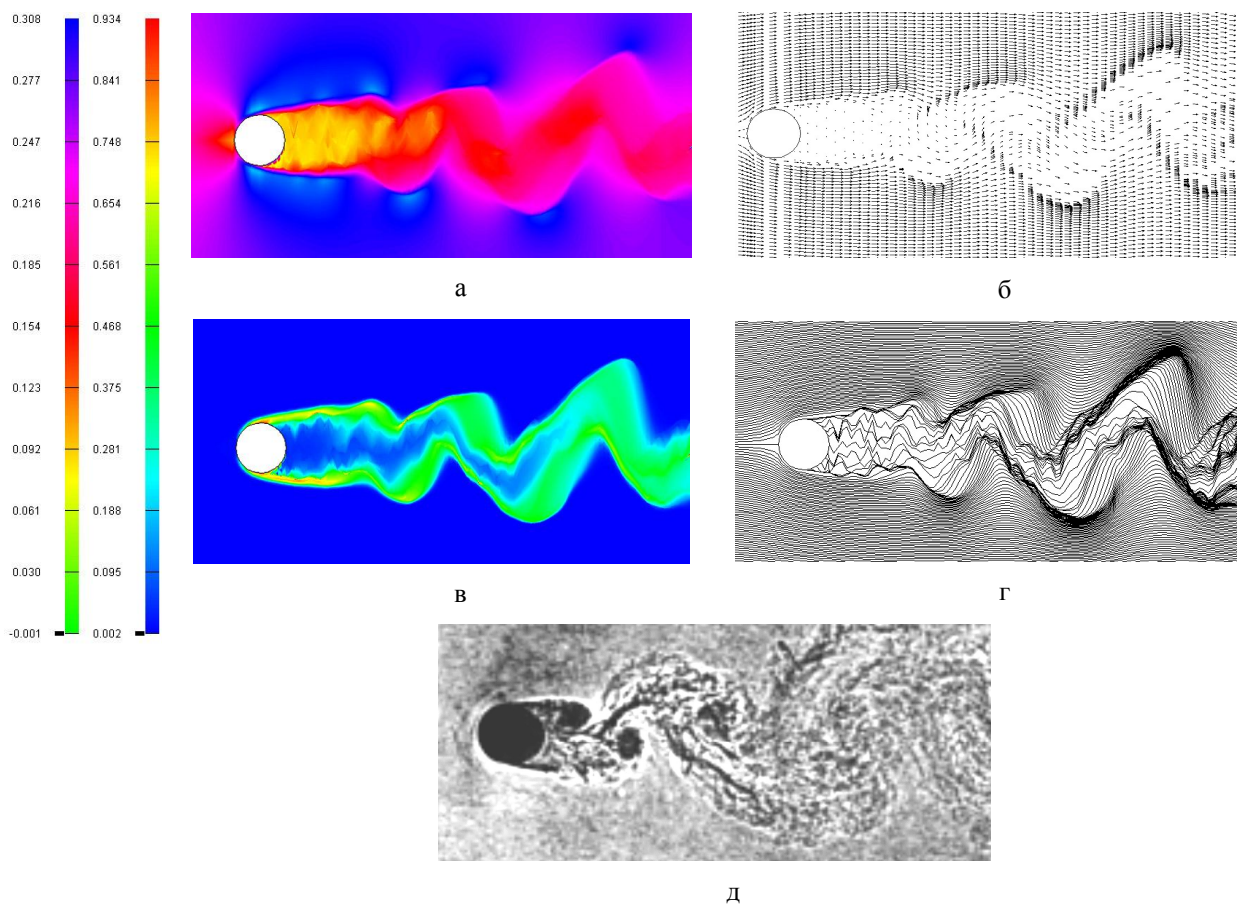


Рис. 1. Мгновенное поле течения вблизи цилиндра:
а – поле безразмерной скорости M ; б – векторное поле скоростей;
в – поле энергии пульсационного движения; г – поле подвижных, сеточных линий;
д – эксперимент [4]

Несмотря на то, что в используемом методе замкнутые формы течения газа в ближнем поле цилиндра не моделировались, получено хорошее соответствие с экспериментальными данными [5] для распределения давления по обводу цилиндра (рис. 2).

На рис. 3 представлено сравнение распределения скорости по оси дальнего следа, полученного в настоящей работе, с экспериментальными данными и результатами расчета, заимствованными из работы [6].

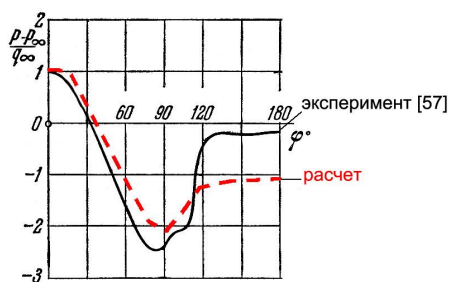


Рис. 2. Распределение давления на поверхности цилиндра при сверхкритическом обтекании

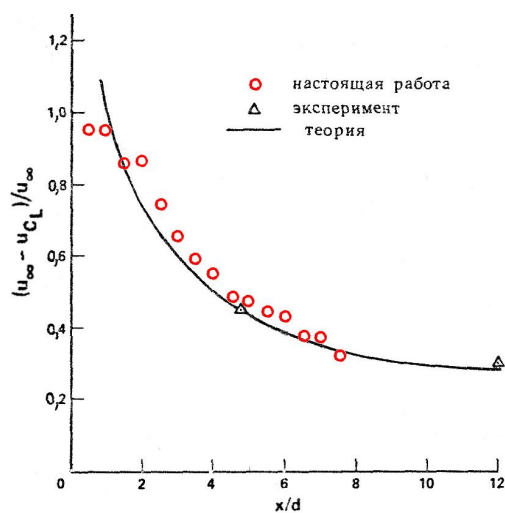


Рис. 3. Распределение на оси следа осевой составляющей скорости

Как видно из рис. 3, полученные результаты хорошо совпадают с экспериментальными данными и теоретической зависимостью в области дальнего следа.

Точки отрыва в методе расчета не задавались. Ее расчетное значение составило $\approx 110^\circ$. Никакого предположения о симметрии или асимметрии картины течения в следе за цилиндром в метод расчета не закладывалось. Нарушение симметрии в начале формирования течения происходит, вероятно, в результате неточности округлений при численной реализации ЭВМ алгоритма расчета. Это приводит к возникновению периодичности течения за цилиндром наподобие дорожки Кармана (рис. 1), наблюдающейся в эксперименте. Расчетное число Струхала: $Sh = f \cdot d / U_\infty$ составило $Sh = 0,22$ (0,2 в эксперименте [5]). Здесь: f – частота отделения вихрей;

d – диаметр цилиндра; U_∞ – скорость набегающего потока

Выводы

1. Подтверждена пригодность разработанного метода расчета для определения аэродинамических характеристик профиля и образующихся следов за ним при отрывном его обтекании.
2. Получено хорошее совпадение расчетных величин с опытными данными для срывного обтекания цилиндра.

Литература

1. Лапотко В.М., Кухтин Ю.П. Преимущества использования подвижных, лагранжевых сеток при численном моделировании течений сплошных сред // *Авиационно-космическая техника и технология: Сб. научн. тр.* – Х.: ХАИ, 2000. – Вып. 19. Тепловые двигатели и энергоустановки. – С. 88-92.
2. Лапотко В.М., Кухтин Ю.П. Модель и метод расчета турбулентных течений вязкого теплопроводного газа // *Авиационно-космическая техника и технология: Научн. техн. журн.* – 2003. – Вып. 41/6. – С. 65-68.
3. Оуэн Ф.К., Джонсон Д.А. О совместном использовании термоанемометрического датчика и лазерного анемометра при исследовании нестационарных вихревых полей течения // *Ракетная техника и космонавтика.* – 1980. – Т. 18, № 10. – С. 30-38.
4. Van Dyke M. *Album of fluid motion-California*: Parabolic Press, 1982. – 340 p.
5. Шлихтинг Г. *Теория пограничного слоя.* – М.: Наука, 1974. – 360 с.
6. *Теория турбулентных струй* / Под ред. Г.Н. Абрамовича. – М.: Наука, Физматгиз, 1984. – 716 с.

Поступила в редакцию 3.06.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.И. Слынько, Запорожский национальный технический университет, Запорожье.