

УДК 532.529

АЭРООПТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В СДВИГОВЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЯХ

© 2011 г.

К.Н. Волков¹, В.Н. Емельянов², И.В. Курова²¹Университет Кингстона, Лондон (Великобритания)²Балтийский государственный технический университет, Санкт-Петербург

k.volkov@kingston.ac.uk

Поступила в редакцию 16.05.2011

Рассматриваются вопросы, связанные с моделированием аэрооптических эффектов в турбулентной струе и свободном слое смешения. Разрабатывается полуэмпирическая модель, предназначенная для исследования искажений фазовой функции когерентного луча, индуцированных турбулентными флуктуациями параметров потока. Проводится моделирование крупных вихрей течений в круглой струе и слое смешения и связанных с ними аэрооптических эффектов. Результаты численных расчетов по различным моделям сравниваются между собой, а также с данными физического эксперимента и данными, полученными на основе решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса.

Ключевые слова: турбулентность, когерентная структура, оптический луч, моделирование крупных вихрей, метод конечного объема.

Введение

Свободные сдвиговые течения характеризуются наличием когерентных структур, представляющих собой вихревые образования, развивающиеся и взаимодействующие друг с другом на фоне мелкомасштабной турбулентности. Образование, взаимодействие и разрушение когерентных структур играет важную роль в распространении когерентного луча через среду и возникновении оптических аберраций (рис. 1).

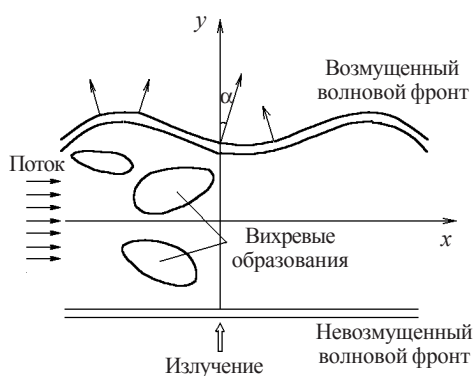


Рис. 1

Флуктуации претерпевают амплитуда и фаза волны, что вызывает появление помех, связанных с изменением структуры оптического луча (расширение, флуктуации направления распространения, расщепление). При этом искажения амплитудных характеристик луча пре-

небрежимо малы по сравнению с флуктуациями фазы.

Ключевым вопросом моделирования аэрооптических эффектов является метод расчета поля флуктуирующих параметров турбулентного потока, в частности поля флуктуаций плотности (плотность связывается с показателем преломления при помощи закона Гладстоуна – Дейла). Для этого развит ряд полуэмпирических моделей различной степени сложности, общей чертой которых является полуэмпирический подход к расчету флуктуаций плотности и допущение о квазистационарности потока [1–5]. На практике спектр масштабов и частот турбулентного течения изменяется на несколько порядков величины, что создает серьезные трудности для прямых измерений и численных расчетов. В данной работе развивается полуэмпирическая модель и проводится моделирование крупных вихрей аэрооптических аберраций в турбулентных сдвиговых течениях. Обсуждаются результаты, полученные в рамках различных подходов, а также проводится их сравнение между собой и с имеющимися расчетными и экспериментальными данными.

Математическая модель

Вихревая модель течения в слое смешения основана на точном решении для течения в плоском вихре Ламба [4]. Поток заменяется бесконечной цепочкой вихрей, расположенных

вдоль одной линии на одинаковом расстоянии друг от друга. Вихревая модель не учитывает размер апертуры и применима при достаточно больших ее значениях, являясь полезным физическим упрощением дозвуковых сдвиговых течений.

Нестационарное течение вязкого сжимаемого газа описывается фильтрованными по пространству уравнениями Навье–Стокса, которые дополняются уравнением состояния совершенного газа и RNG-моделью подсеточной вязкости [5–7]. Дискретизация основных уравнений проводится при помощи метода конечных объемов. Для дискретизации по времени используется пятишаговый метод Рунге–Кутты. Вектор потока расщепляется на невязкую и вязкую составляющие. Для дискретизации невязких потоков применяется метод кусочно-параболической реконструкции и схема Чакраварти–Ошера, а для дискретизации вязких потоков – центрированные конечно-разностные формулы 2-го порядка. Система разностных уравнений решается многосеточным методом на основе схемы полной аппроксимации. В качестве сглаживающего алгоритма применяется обобщенный метод взвешенных невязок. В низкоскоростных областях потока используется блочный метод предобуславливания Якоби.

Результаты расчетов

Два полубесконечных потока газа движутся в одном направлении со скоростями U_1 и U_2 друг относительно друга вдоль плоскости $x < 0$, $y = 0$. В точке $x = 0$ потоки соприкасаются, и при $x > 0$ граница между ними турбулизируется. Расчеты проводятся на сетке $250 \times 80 \times 80$ при $Re_8 = 2 \cdot 10^5$ (число Рейнольдса рассчитывается по толщине потери импульса) и $M_c = 0.24$ (M_c – эффективное число Маха).

Расчетная область имеет длину $25\delta_{w0}$ и ширину $6\delta_{w0}$ (δ_w – толщина потери завихренности, индекс 0 относится к начальному сечению). В направлении оси z протяженность области составляет $5\delta_{w0}$. Шаг по времени равняется $1.5 \cdot 10^{-3}$ с. Результаты расчетов (рис. 2) по вихревой модели (линия 1) имеют удовлетворительное согласование с данными физического эксперимента [2] (при $A = 20$ см обозначены светлыми кружками, при $A = 30$ см обозначены темными кружками) в случае достаточно больших размеров апертуры (при $A > 20$ см) и результатами моделирования крупных вихрей (квадратики). Пунктирная линия на рис. 2 соответствует результатам [3] при использовании синусоидального закона для угла отклонения луча. Согласование расчетных данных с данными измерений ухудшается вниз по потоку.

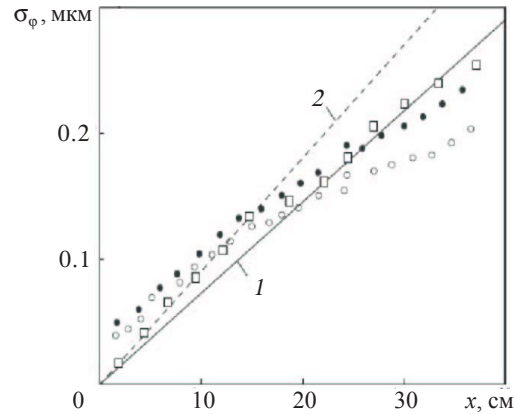


Рис. 2

Для волнового спектра имеет место степенная зависимость $S_\varphi(k_x L) \sim (k_x L)^{-q}$, где $q \sim 2$ для слоя смешения и $q \sim 2.5$ для свободной струи. Сжимаемость сравнительно слабо сказывается на поведении спектра и, в основном, это влияние имеет место при больших волновых числах. Спектр для струи круче, чем для слоя смешения из-за более сильного турбулентного перемешивания. При этом число Рейнольдса, вычисленное по параметрам на срезе сопла, не оказывает существенного влияния на спектр.

Заключение

Полуэмпирические соотношения, построенные на основе вихревой модели течения, позволяют с удовлетворительной точностью рассчитывать среднеквадратическую величину оптических аберраций в свободных сдвиговых течениях. Зависимость среднеквадратической величины флуктуаций фазы волны от динамического давления является линейной от координаты, отсчитываемой вдоль направления распространения потока. Спектр флуктуаций фазы достаточно слабо зависит от параметров на входе в расчетную область и сжимаемости потока.

Полученные результаты представляются полезными для учета влияния флуктуаций плотности на прохождение оптического излучения через случайно-неоднородную среду в расчетах, основанных на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса. Разработанные средства численного моделирования могут быть использованы для исследования искажений фазовой функции когерентного луча, индуцированных турбулентными флуктуациями параметров среды, в лазерных измерительных системах и других устройствах, а также для развития адаптивных методов компенсации искажений оптического сигнала, в частности, в когерентных адаптив-

ных оптических системах с управлением волновым фронтом излучаемого поля.

Список литературы

1. Jumper E.J., Fitzgerald E.J. Recent advances in aero-optics // *Progress in Aerospace Sciences*. 2001. V. 37, No 3. P. 299–339.
2. Siegenthaler J.P., Gordeyev S., Jumper E. Shear layers and aperture effects for aero-optics // *AIAA Paper 2005-4772*.
3. Gordeyev S., Jumper E.J. Aero-optical characteristics of compressible, subsonic turbulent boundary layers // *AIAA Paper 2003–3606*.
4. Волков К.Н. Влияние турбулентности на рас-

пространение когерентного луча в пограничном слое и слое смешения // *Прикладная механика и техническая физика*. 2010. Т. 51, №6. С. 63–77.

5. Волков К.Н., Емельянов В.Н. Аэрооптические эффекты в турбулентном потоке и их моделирование // *Журнал технической физики*. 2008. Т. 78, №2. С. 77–84.

6. Волков К.Н., Емельянов В.Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. М.: Физматлит, 2008. 364 с.

7. Volkov K.N. Large-eddy simulation of free shear and wall-bounded turbulent flows // *Atmospheric Turbulence, Meteorological Modelling and Aerodynamics*. USA, Nova Science, 2010. P. 505–574.

AERO-OPTICAL EFFECTS IN SHEAR TURBULENT FLOWS

K.N. Volkov, V.N. Emelyanov, I.V. Kurova

Formation, interaction and destruction of coherent structures play an important role in the propagation of a coherent beam through the environment and the occurrence of optical aberrations. The issues related to modelling of aero-optical effects in a turbulent jet and free shear layer are considered. A semi-empirical model designed to study the distortion of the phase function of the coherent beam, induced by turbulent flow fluctuations, is developed. Large eddy simulation of flows in a turbulent jet and free shear layer is performed. Unsteady turbulent flow of viscous compressible gas is described by the space-filtered Navier–Stokes equations, closed with equation of state of a perfect gas and the RNG sub-grid scale model. The results of calculations with the vortex model and numerical results obtained are compared with each other, and with the experimental data and the data computed with the Reynolds-averaged Navier–Stokes equations.

Keywords: turbulence, coherent structure, optical beam, large eddy simulation, finite volume method.