

# ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ ШТРАФНЫХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

О.В. Васильев, Н.С. Жданова

*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН,  
Москва, nat.zhdanova@gmail.com*

Известно, что для численного решения задач аэродинамики, характеризующихся высоким числом Рейнольдса, необходимо высокое разрешение расчетной сетки вблизи границы обтекаемого тела. Это накладывает жесткие требования к объему вычислительных ресурсов, увеличивает время счета задачи и усложняет построение самой сетки. Ограничения на размер расчетных ячеек вблизи поверхности тела могут быть заметно снижены применением методов на основе пристеночных функций [1], что достигается заменой граничных условий прилипания на поверхности тела условием сшивки пристеночной функции с внешней областью турбулентного пограничного слоя. Пристеночные функции дают возможность переноса касательных напряжений из внешней области пограничного слоя на поверхность тела посредством использования условия проскальзывания, задаваемое в неявном виде пристеночной функцией.

В традиционных подходах (см., например, [2]) граничные условия определяются путем решения нелинейных уравнений в точке сшивки, при этом сама точка сшивки заранее не известна, так как неявно задана расстоянием от стенки, нормированным на масштаб вязкой длины, который, в свою очередь, является функцией касательного напряжения на стенке.

Основная идея разработанного метода заключается в замене алгебраического условия сшивки внешнего решения с пристеночной функцией на дифференциальную формулировку, позволяющую использовать обобщение метода характеристических штрафных функций [3] для переноса касательного напряжения из внешней области пограничного слоя на поверхность тела. При этом область сшивки задается неявно

через локализованный источниковый член в уравнении пограничного слоя, записанный как функция расстояния от стенки, нормированного на масштаб вязкой длины. Такой подход позволяет, во-первых, полностью устранить плохо-определенное условие точки сшивки решений и, во-вторых, свести систему дифференциальных уравнений с нелинейными алгебраическими связями к системе уравнений с дифференциальными обратными связями, основанном на методе характеристических штрафных функций и обеспечивающим эту связь. Последнее обстоятельство определяет возможное развитие метода, связанное с применением дифференциальных пристеночных функций (для задач с сильными отрывами). В целом, новый метод позволяет заметно снизить требования к пристеночному разрешению расчетной сетки без существенного усложнения вычислительного алгоритма.

Численная реализация метода проведена на базе программного комплекса NOISEtte с применением вершинно-центрированного метода контрольных объемов и EBR (Edge Based Reconstruction) схемы повышенной точности.

Возможности метода показаны на примере численного решения задач о течении в канале и обтекания плоской пластины при больших числах Рейнольдса. Используются различные способы задания граничных условий на твердой стенке: применение согласованных с границей сеток и метод погруженных границ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (Проект 20-41-09018).

## **Литература**

1. T.J. Craft *et al.* Development and application of wall-function treatments for turbulent forced and mixed convection flows. *Fluid Dyn. Res.*, v.38(2), 2006, pp.127–144.
2. B.E. Launder, D.B. Spalding. The numerical computation of turbulent flows. *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.*, v.3(2), 1974, pp.269–289.
3. E. Brown-Dymkoski, N. Kasimov, O.V. Vasilyev. A Characteristic Based Volume Penalization Method for General Evolution Problems Applied to Compressible Viscous Flows. *J. Comput. Phys.*, v.262, 2014, pp.344–357.