

Численное моделирование несжимаемых течений около пластины с микровдувом *

А.В. БАЗОВКИН

Институт вычислительных технологий СО РАН

e-mail: abazovkin@gmail.com

В.М. КОВЕНЯ

e-mail: kovenya@ict.nsc.ru

А.С. ЛЕБЕДЕВ

e-mail: saha@ict.nsc.ru

В работе на основе уравнений Навье — Стокса вязкой несжимаемой жидкости численно моделируются течения газа около пластины при малых скоростях. Исследуется влияния интенсивности микровдува с части поверхности и его распределения на поведение локального и интегрального коэффициентов трения. Турбулентная вязкость вычисляется с помощью алгебраической модели. Расчеты показывают, что при сохранении общей интенсивности вдува интегральное значение трения практически не зависит от распределения участков вдува по поверхности. Основные закономерности влияния микровдува на сопротивление трения качественно согласуются с результатами экспериментов.

Снижение сопротивления трения около элементов летательного аппарата может быть достигнуто различными путями, одним из которых является вдув газа с части поверхности. В работе численно моделируются течения газа около пластины при малых скоростях. Целью моделирования является исследование влияния интенсивности микровдува с части поверхности и его распределения на поведение локального и интегрального коэффициентов трения. В качестве математической модели выбраны уравнения Навье — Стокса вязкой несжимаемой жидкости, записанные в декартовой системе координат:

$$\mathbf{M} \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial t} = -\mathbf{W}, \quad \mathbf{W} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \mathbf{W}_i. \quad (1)$$

Здесь

$$\mathbf{f} = \begin{pmatrix} p \\ v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{M} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{W}_i = \begin{pmatrix} v_i \\ v_i v_1 + \delta_i^1 p - \tau_{i1} \\ v_i v_2 + \delta_i^2 p - \tau_{i2} \\ v_i v_3 + \delta_i^3 p - \tau_{i3} \end{pmatrix}, \quad \tau_{ij} = \eta \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right),$$

v_i — компоненты скорости, p — давление, η — коэффициент вязкости.

Для обеспечения большей достоверности численных результатов решение уравнений (1) находилось по двум численным алгоритмам. Первый алгоритм [1] использует приближенную факторизацию, основанную на специальном расщеплении исходных уравнений по физическим процессам и пространственным направлениям таким образом,

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН № 103.

чтобы реализация метода на промежуточных шагах сводилась к решению уравнений движения трёхточечными скалярными прогонками, а новое значение давления находилось из уравнения Пуассона методом установления по схеме ещё одной приближённой факторизации. В целом, данный алгоритм аппроксимирует исходные уравнения со вторым порядком и позволяет находить решение как стационарных, так и не стационарных уравнений Навье — Стокса (подробнее, см. [1]). Во втором алгоритме, использующем разнесенную сетку и идею искусственной сжимаемости, давление на новом временном слое и компоненты скорости, удовлетворяющие уравнению неразрывности, отыскиваются с помощью так называемых внутренних итераций.

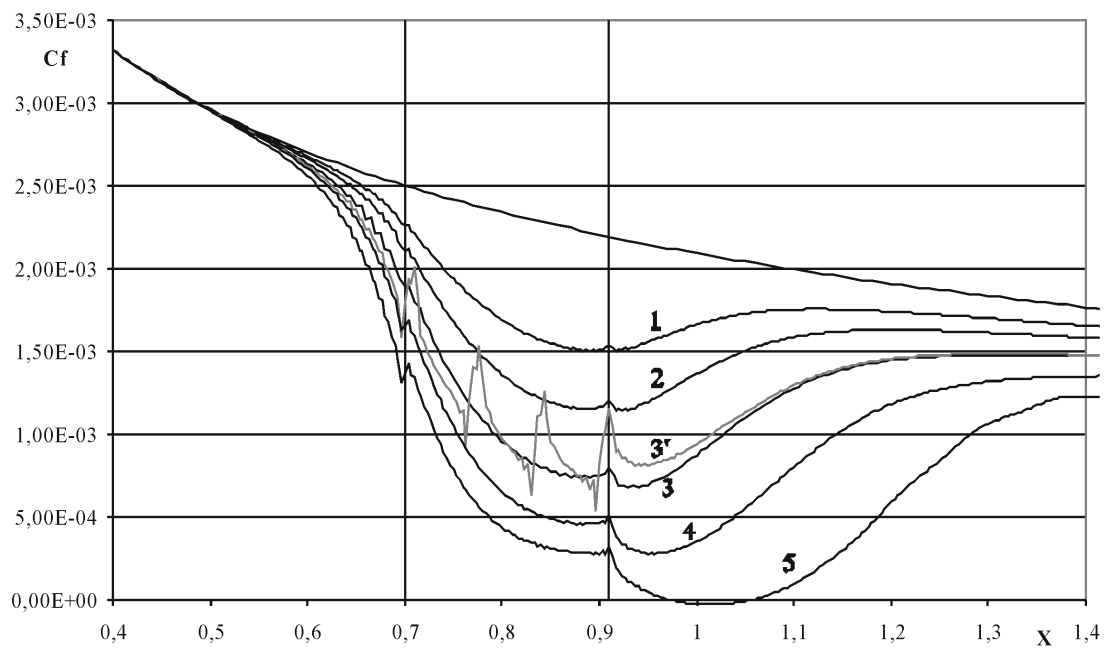
Задача об обтекании пластины потоком газа со вдувом с части поверхности пластины рассматривалась в двумерном приближении и формулировалась следующим образом. Во входном сечении расчётной области (прямоугольник) задавались параметры набегающего потока, взятые из решения уравнений пограничного слоя. На верхней границе, расположенной вне пограничного слоя, продольная скорость полагалась равной скорости в набегающем потоке, а на выходной границе задавались мягкие условия. На пластине задавались условия прилипания, кроме части области, из которой осуществлялся вдув.

Проведено моделирование течений газа около пластины для различных чисел Рейнольдса и различной интенсивности вдува с целью оценки его влияния на сопротивление трения. Вдув осуществлялся либо со всей заданной части поверхности, либо с последовательности равномерно расположенных на ней участков, число которых варьировалось. Серия расчётов показала, что для различного числа участков вдува (при сохранении массового расхода) интегральный коэффициент сопротивления приближается к значению, соответствующему вдуву со всего участка (равномерному вдуву). В таблице приводится относительное отклонение величины интегрального коэффициента сопротивления C_f при различном количестве участков вдува по отношению к коэффициенту C_{fu} , вычисленному для равномерного вдува, при $Re = 10^5$, скорости вдува $U_W = 2.27 \times 10^{-3} U_\infty$. Хотя количество участков вдува варьировалось, общая их площадь не менялась и составляла 20% от площади равномерного вдува. (Заметим, что в аналогичной серии расчётов, в которой вдув осуществлялся с 55.6% заданной части поверхности, получены аналогичные результаты.)

Количество участков	3	6	12
$(C_{fu} - C_f)/C_{fu}$	1.17%	0.33%	-0.07%

В следующей серии расчетов исследовано влияние интенсивности вдува на сопротивление трения для равномерного вдува. На рисунке приведены зависимости коэффициента трения для различных интенсивностей вдува при $Re = 10^5$. Верхняя кривая соответствует течению без вдува, кривая 1 — вдуву $U_W = 1.087 \times 10^{-3} U_\infty$, а кривые 2 — 5 соответствуют интенсивностям вдува в 1.6, 2.5, 3.5 и 4.7 раз большим, чем для кривой 1.

Кривая 3' показывает поведение коэффициента трения при четырёх участках вду-



ва, с массовым расходом как для кривой 3. Относительное отличие результатов при вдуве с участков и при равномерном вдуве (кривые 3' и 3) равно $(C_{fu} - C_f)/C_{fu} = -0.7\%$. При усилении вдува значение коэффициента сопротивления за областью вдува становится отрицательным, что может свидетельствовать об отрыве пограничного слоя (кривая 5).

Список литературы

- [1] Базовкин А.В., Вавилова О.М., Ковеня В.М. Метод факторизации для численного решения уравнений вязкой несжимаемой жидкости // Вычисл.технологии. 2009. Т. 14, №2, С. 13-31.