

МЕТОД РАСЧЕТА ТЕЧЕНИЯ В ПЛОСКИХ РЕШЕТКАХ ПРОФИЛЕЙ

Использование математических моделей, адекватно описывающих течения в элементах турбомашин, позволяет существенно сократить усилия, средства и время, затрачиваемые на их проектирование. Высокая энергоемкость и стоимость экспериментальных исследований околосвуковых течений в решетках турбомашин делают предпочтительными методы теоретического анализа.

Большинство существующих методов расчета трансзвуковых течений в решетках профилей, разработанных в странах СНГ, основаны на использовании конечно-разностной схемы С.К.Годунова и ее более поздних модификаций [1,5]. Однако для практики большой интерес представляет апробация новых алгоритмов, позволяющих получать детальную информацию о процессах, происходящих в межлопаточных каналах решеток турбомашин. Авторами для исследования выбран метод крупных частиц [2], широко применяемый для численного моделирования в аэродинамике.

Основная идея численного метода крупных частиц заключается в расщеплении по физическим процессам исходной нестационарной системы уравнений движения Эйлера. Расчетная область разбивается на подвижную эйлеровую сетку, среда моделируется системой из жидких (крупных) частиц, совпадающих в данный момент времени с ячейкой сетки. Стационарное решение получается в результате установления вычислительного процесса во времени. Расчет каждого временного шага разбивается в свою очередь на три этапа.

I-эйлеров этап. Жидкость предполагается заторможенной, перенос массы через границы ячеек отсутствует. Рассматривается изменение состояния внутри ячейки, обусловленное внешними силами. Определяются промежуточные значения параметров потока.

II-лагранжев этап. Частицы перемещаются без изменения внутреннего состояния. Вычисляются потоки массы через границы ячеек за время Δt .

III-заключительный этап. Перераспределяются масса, импульс и энергия в расчетной области. Определяются окончательные значения параметров потока.

Для рассматриваемого плоского случая система уравнений Эйлера в декартовой системе координат имеет вид:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = 0,$$

$$\text{где } Q = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho U \\ \rho V \\ \rho E \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} \rho U^2 + P \\ \rho UV \\ (\rho E + P)U \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho VU \\ \rho V^2 + P \\ (\rho E + P)V \end{bmatrix}.$$

Здесь через ρ, P, U, V, E обозначены соответственно плотность, давление, составляющие вектора скорости вдоль координатных осей Ox и Oy и удельная полная энергия. Для замыкания системы используется уравнение состояния идеального газа $P = \rho RT$, где R — универсальная газовая постоянная, T — статическая температура.

Для дискретизации системы уравнений выбрана декартова система координат, что обуславливает существенную экономию ресурсов ЭВМ и приемлемую точность получаемых результатов. Область интегрирования представлена на рис. 1.

Левая и правая границы расчетной области удалены от фронта решетки на расстоянии d . Расстояние между верхней и нижней границами равно шагу решетки с учетом угла установки профиля в ней.

При дозвуковой скорости набегающего потока на границе AB задаются постоянными во времени значения полной энтальпии, энтропийной функции и направления невозмущенного потока. При сверхзвуковой относительной скорости на входе вместо условия $\beta_1 = \text{const}$ на границе задается величина угла входа потока в абсолютном движении. Значения параметров потока в ячейках, прилегающих к левой границе, определяются из условия сохранения на каждом временном слое левого инварианта Римана, вычисленного в локально-одномерной постановке.

На правой границе CD задано значение статического давления. Величины остальных параметров потока определяются из условия сохранения значений правого инварианта Римана, угла выхода потока и энтропийной функции.

Вдоль линий BC и AD , задаются условия периодичности, которые осуществляются путем переноса значений параметров потока ρ, P, U, V из реального слоя AD , в фиктивный слой BC и из реального слоя BC в фиктивный AD .

На поверхности профиля заданы условия непротекания. Криволинейные образующие аппроксимируются отрезками прямых, соединяющих точки пересечения контура с границами эйлеровой сетки. Ячейки, лежащие на границе профиля с внешней стороны, как частичные, так и целые, условно названы "дробными".

Комплекс программ TRANS /3/, разработанный на основе метода крупных частиц, предназначен для проведения численного исследования обтекания решеток профилей. В данной статье представлены некоторые результаты проведенных с его помощью методических исследований и тестовых расчетов.

Для определения влияния количества ячеек на профиле на полу-

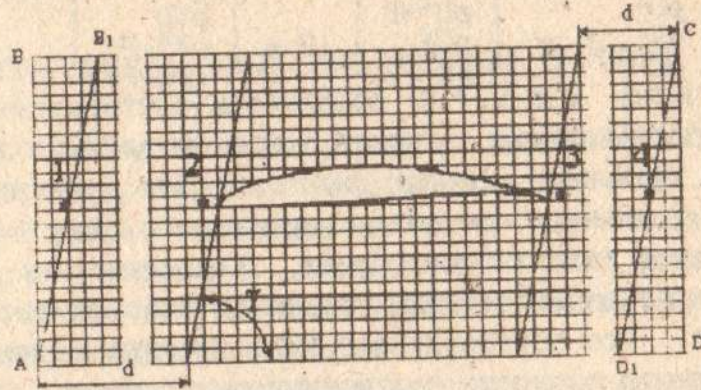
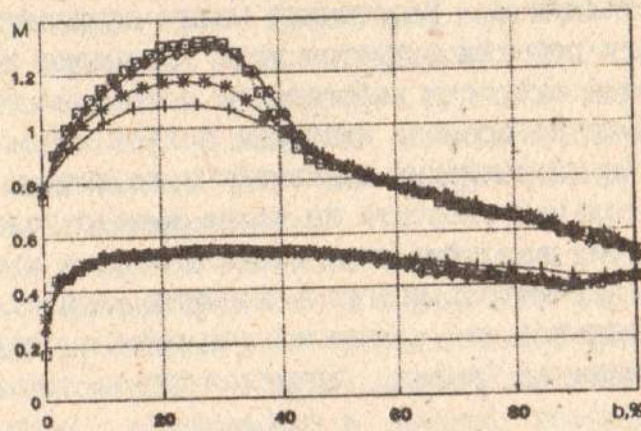
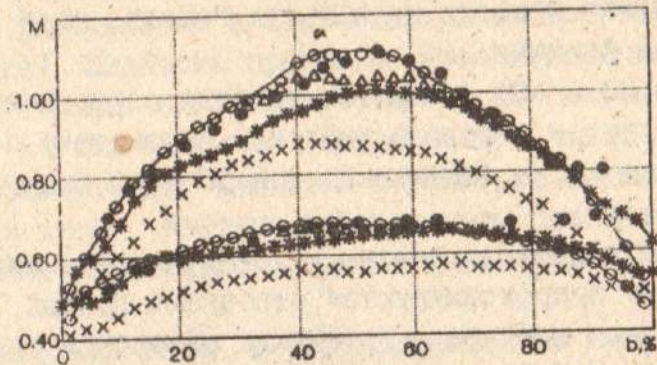


Рис.1. Расчетная схема.

Рис.2. Влияние размеров сетки на результаты расчета:
—+— - NS=20; *— - NS=30; —◊— - NS=40; —◻— - NS=50.Рис.3. Расчет трансзвукового течения в решетке Хобсона:
*— метод крупных частиц; — — метод годографа; • - эксперимент;
x - метод Годунова (1-й порядок); Δ - метод Годунова-Колгана; o - метод
Годунова (2-й порядок)

чаемые результаты исследовано обтекание решетки NASA65(12)10 при 20, 30, 40 и 50 ячейках на профиле (рис.2). Для всех вариантов сеток наблюдается хорошее совпадение на корытце и значительные расхождения на спинке. Очевидно, что при увеличении количества ячеек на профиле, повышается точность аппроксимации контура исходного профиля ломаной линией, и расхождение между получаемыми распределениями чисел M уменьшаются.

Широкое применение для тестирования методов для расчета течений в решетках профилей нашла решетка Хобсона/4,5/. Для её исследования исходные данные принимались согласно /5/.

На рис.3 представлено распределение чисел Маха вдоль хорды профиля решетки Хобсона, полученное с использованием программного комплекса TRANS, в сопоставлении с результатами расчетов и экспериментальными данными, приведенными в работе /5/.

Проведенное тестирование показало, что данная методика, построенная на базе метода крупных частиц первого порядка точности позволяет получить результаты, сопоставимые с результатами, полученными на основе разностных схем более высокого порядка при том же количестве ячеек на профиле, обеспечивая существенную экономию ресурсов ЭВМ. Кроме этого, следует отметить удовлетворительное соответствие результатам эксперимента.

Данные проведенных методических исследований, а также сопоставление с опытными данными, приведенное в /3/, позволяют сделать вывод о работоспособности и удовлетворительной точности предлагаемой методики расчета трансзвуковых течений в решетках профилей и рекомендовать её для проведения практических инженерных расчетов.

Литература.

1. Соколовский Г.А., Гнесин В.И. Нестационарные трансзвуковые и вязкие течения в турбомашинах. Киев.Наук.думка, 1986. 264с.
2. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц в газовой динамике. М.Наука, 1982. 392с.
3. Бойко Л.Г., Демин А.Е., Калямин Д.В. Комплекс программ для расчета двумерного невязкого трансзвукового течения в решетках компрессорных ступеней//Изв.ВУЗов.Машиностроение. 1991. №3. с.38-42
4. Гостелову Д. Аэродинамика решеток турбомашин М.Мир, 1987. 392с.
5. Гнесин В.И., Ершов С.В., Горжейши И. Расчет двумерных трансзвуковых течений в решетках профилей с использованием разностных схем С.К.Годунова и А.Джеймсона. Киев. Проблемы машиностроения. №33. 1990. с.82-89.