

УДК 33.6.3 : 629.7(075.8)

**Л.Г. ВОЛЯНСКАЯ, Ф.И. КИРЧУ, В.В. ПАНИН, Ю.Ю. ТЕРЕЩЕНКО**

*Национальный авиационный университет, Киев, Украина*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПОДЪЕМНОЙ СИЛЫ И СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОФИЛЯ В КОМПРЕССОРНОЙ РЕШЕТКЕ**

В данной статье рассматриваются вопросы, связанные с определением коэффициентов подъемной силы и сопротивления профиля в компрессорной решетке по известному распределению давления, а также сравниваются результаты расчетов коэффициентов рассчитанных по приближенным формулам и по уточненным.

**компрессор, профиль, лопатка, аэродинамические коэффициенты, распределение давлений**

### **Введение**

При проектировании осевых компрессоров широко распространены экспериментальные методы определения характеристик компрессоров, основанные на исследовании натуральных или модельных трехмерных ступеней в высокоскоростном сжимаемом потоке газа. В связи с быстрым ростом производительности вычислительной техники, все чаще применяются численные методы для определения характеристик ступеней и многоступенчатых компрессоров. При аэродинамическом проектировании ступеней осевых компрессоров, расчеты базируются на анализе течения газа через элементарные ступени, расположенные на различных радиусах. При этом предполагается, что элементарные ступени работают независимо друг от друга. Полагая, что течение газа происходит на концентрических поверхностях тока, близких к цилиндрическим, и что радиальная протяженность каждой элементарной ступени бесконечно мала, можно вместо осесимметричного течения рассматривать его развертку на плоскости, то есть рассматривать течение газа через плоские решетки.

Исследование плоских компрессорных решеток позволяет определить влияние угла атаки и формы профиля на углы входа и выхода газа, и на аэродинамические коэффициенты.

### **1. Формулирование задачи**

Известны следующие методы экспериментального определения аэродинамических характеристик профилей в решетках:

1. Метод непосредственного измерения аэродинамических характеристик профилей при помощи аэродинамических весов [1];
2. По кинематическим параметрам потока обтекающей решетки [2];
3. По распределению давления по поверхности профиля [3];

Основные недостатки этих методов состоят в следующем:

1. Определение аэродинамических коэффициентов профиля в решетке при помощи аэродинамических весов достаточно сложно [1]. Применение данного способа, требует большой точности в изготовлении экспериментальной модели и больших трудозатрат при проведении эксперимента;
2. Второй способ также имеет некоторые недостатки, хотя по сравнению с первым он выигрывает в простоте измерений и исполнении моделей. К недостаткам можно отнести недостаточную точность измерения параметров на входе и выходе из решетки, а также необходимость осреднения параметров вдоль решетки, что вносит существенные погрешности;

3. Третий способ наиболее прост в исполнении, имеет высокую точность, не предъявляет повышенных требований к измерительной аппаратуре. Однако также имеет некоторые недостатки: ограничение размеров модели, не достаточная точность пересчета распределения давления профиля в аэродинамические коэффициенты, не возможность измерить распределение давления вдоль всего профиля, что обусловлено размерами передней и задней кромки.

Вышеперечисленные недостатки существующих способов определения аэродинамических коэффициентов профиля в решетке обусловили разработку принципиально нового способа определения коэффициентов  $C_x$  и  $C_y$  по известному распределению давления по профилю.

## 2. Способ определения аэродинамических коэффициентов

Аэродинамическая сила, действующая на профиль, проявляется как результирующая (равнодействующая) элементарных сил давления и трения, распределенных по профилю. Чтобы иметь данные для расчета лопатки на прочность и причины изменения аэродинамических характеристик с изменением угла атаки, недостаточно знать величину коэффициентов  $C_x$ ,  $C_y$ ,  $C_m$ . Необходимо также иметь представление о распределении давления по профилю. Это распределение давления может быть найдено как теоретически, так и экспериментально.

В практике чаще всего пользуются распределением давления, полученным опытным путем. Для этой цели используют специальные модели лопаток с дренажем.

Распределение давления вдоль профиля также можно найти и при помощи математического моделирования. Рост и производительность вычислительных машин позволяет применять численные методы исследования, основанные на расчете конечно-элементных моделей. Используя такие моде-

ли можно определить давление в любой точке на поверхности профиля.

Картины давлений принято изображать в виде эпюр давления (рис. 1) и в виде стрелок векторов (рис. 2).

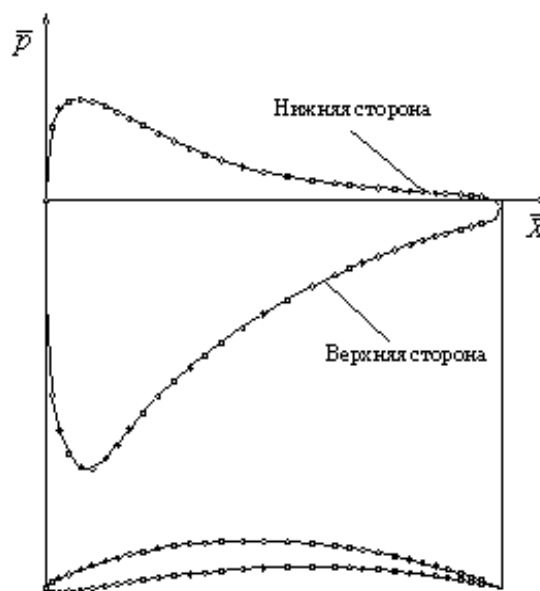


Рис. 1. Распределение давления по профилю в виде эпюры давления

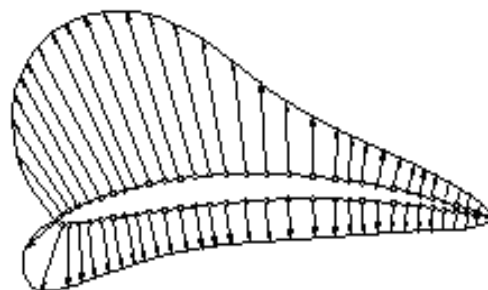


Рис. 2. Распределение давления по профилю в виде стрелок векторов

На эпюре давления ось абсцисс представляет относительное расстояние  $\bar{x} = x/b$  от передней кромки по хорде (в долях хорды –  $b$ ). На оси ординат указывают не абсолютную величину давления, а разность давлений  $\Delta p = p_{мест} - p_\infty$  в долях скоростного напора

$$q_\infty = \frac{\rho_\infty V_\infty^2}{2}, \quad (1)$$

где  $p_{мест}$  – местное давление в данной точке поверхности лопатки;

$\rho_\infty$  – плотность невозмущенного потока;

$V_\infty$  – скорость невозмущенного потока.

Эту относительную (безразмерную) разность давлений  $\bar{p} = \frac{p_{мест} - p_\infty}{q_\infty}$  называют коэффициентом давления.

Эпюры давлений позволяют строить распределение нагрузок от сил давления по хорде, при этом векторы  $\bar{p}$  проектируются на перпендикуляр к хорде и эти проекции откладываются вверх или вниз в зависимости от направления вектора  $\bar{p}$ . Интегрирование нагрузок, распределенных по хорде дает величину подъемной силы:

$$Y_l = \int_0^b \Delta p_n \cos(x_1, ds_n) ds_n - \int_0^b \Delta p_e \cos(x_1, ds_e) ds_e. \quad (2)$$

Разделив выражение (2) на  $q_\infty S = q_\infty b \cdot 1$  получим приближенную формулу для определения  $C_y$ :

$$C_y \approx C_{y1} \approx \int_0^1 (\bar{p}_n - \bar{p}_e) d\bar{x}_1, \quad (3)$$

где  $\bar{p}_n$  – коэффициент давления на нижней стороне профиля;  $\bar{p}_e$  – коэффициент давления на верхней стороне.

Если вектор  $\bar{p}$  проектировать не на перпендикуляр к хорде, а на хорду (рис. 3), и проекции откладывать вдоль ординаты, соответствующей точке максимальной толщины профиля, то полученные таким путем эпюры нагрузок позволяют найти профильное сопротивление:

$$C_{x1проф} = \int_0^{\bar{c}} \bar{p}_n \sin(x_1, ds_n) ds_n + \int_0^b \bar{p}_e \sin(x_1, ds_e) ds_e \quad (4)$$

или

$$C_{x1проф} = \int_0^1 (\bar{p}_n - \bar{p}_e) d(y/c), \quad (5)$$

где  $\bar{p}_n, \bar{p}_e$  – коэффициенты давления в точках передней и задней части профиля, разграниченных ординатой максимальной толщины.

Коэффициент момента при любом угле атаки может быть найден по формуле

$$C_m = \int_0^1 p_n \cos(x_1, ds_n) \bar{x}_1 ds_n - \int_0^1 p_e \cos(x_1, ds_e) \bar{x}_1 ds_e. \quad (6)$$

Для повышения точности вычислений аэродинамических коэффициентов в данной статье предлагается рассчитывать угол между вектором давления и касательной в данной точке профиля по следующей методике:

1. Построение профиля по заданным координатам  $x, y$ ;

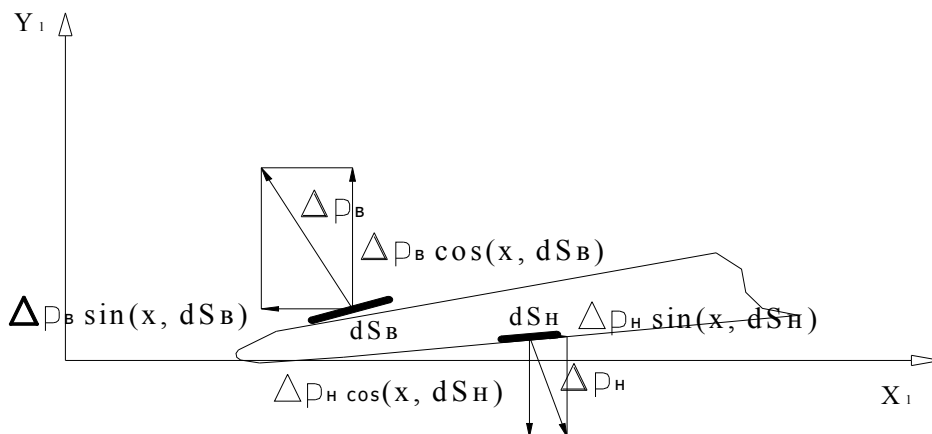


Рис. 3. Схема разложения вектора давления на составляющие

2. Аппроксимация данного профиля с помощью неоднородного  $\beta$ -сплайна;

3. Дифференцирование полученной функции  $y = f(x)$ , такое дифференцирование дает тангенс угла наклона между касательной к профилю и хордой в любой точке профиля;

4. Зная угол наклона между касательной к профилю и хордой можно легко разложить вектор давления на составляющие и по формулам (2), (4), (6) определить аэродинамические коэффициенты.

На рис. 4 представлены зависимости коэффициентов  $C_y$  и  $C_x$  от угла атаки, приведено сравнение расчетов аэродинамических коэффициентов по приближенным формулам и по формулам с точным расчетом угла наклона вектора давления к поверхности профиля в каждой точке контура.

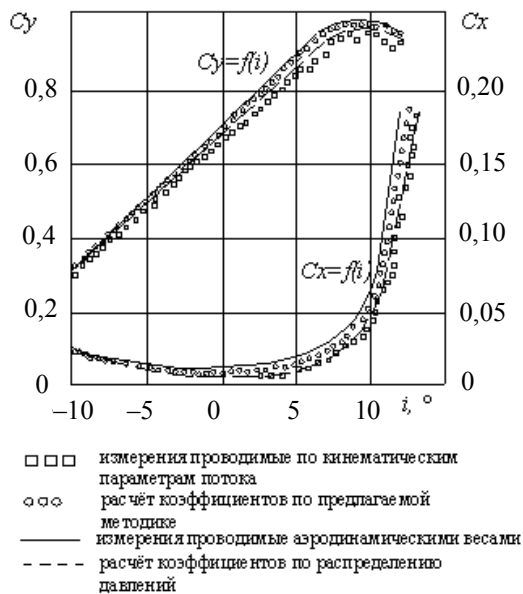


Рис. 4. Сравнение результатов определения аэродинамических коэффициентов разными способами

Как видно из графика наиболее точный результат дает метод определения аэродинамических коэффициентов при помощи аэродинамических весов, менее удовлетворительный результат получен при их определении по кинематическим параметрам потока.

Определение  $C_x$  и  $C_y$  по распределению давлений дает большую погрешность по сравнению с методом определения аэродинамическими весами, но более точный результат, чем при определении по кинематическим параметрам. Это связано с малой густотой дренажных отверстий на исследуемом профиле. Определение аэродинамических коэффициентов при помощи предложенной методики дает более точный результат, чем пересчет коэффициентов из распределения давления по приближенным формулам.

### Заключение

Анализ результатов исследований, показывает, что вычисление аэродинамических коэффициентов профиля в компрессорной решетке по известному распределению давления, с использованием предложенной методики более предпочтительно, с точки зрения компромиссного подхода – «трудозатраты – погрешность». Исходя из этого, данную методику можно рекомендовать для использования при решении различных прикладных задач аэродинамики.

### Литература

1. Волянська Л.Г. Спосіб експериментального визначення аеродинамічних характеристик профіля в плоских компресорних решітках // Вісник НАУ. – К.: НАУ. – 2003. – № 1. – С. 31 – 32.
2. Терещенко Ю.М., Аэродинамическое совершенствование лопаточных аппаратов компрессоров. – М.: Машиностроение, 1987. – 167 с.
3. Мельников А.П. Основы прикладной аэродинамики. – Л.: ЛКВВИА, 1959. – 450 с.

Поступила в редакцию 20.05.2005

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С.А Дмитриев, Аэрокосмический институт, Киев.