

УДК 621.51

А.Н. АНЮТИН, Л.Н. БУСЛИК, А.Г. ВОЛОВ, А.Е. ДЕМИН

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Украина

## ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ ПОТЕРЬ В КОМПРЕССОРНОЙ РЕШЕТКЕ С НАКЛОННЫМИ ИЛИ ИЗОГНУТЫМИ В ОКРУЖНОМ НАПРАВЛЕНИИ ЛОПАТКАМИ

На основе вихревого подхода предложено теоретическое решение задачи о течении в компрессорной ступени с наклонными и изогнутыми лопатками. Приведена последовательность решения задачи. Рассмотрено изменение скоростей потока на профиле, обусловленное наклоном лопатки. Проведена оценка изменения степени диффузорности на спинке профиля, а также для потока вблизи ограничивающей стенки. На основе представления вихревой схемы лопатки в виде одиночного вихря, расположенного в плоскости нормальной оси компрессора, предложен подход к оценке влияния наклона лопатки на потери в пристеночной области в компрессорной ступени с наклонными и изогнутыми лопатками.

**Ключевые слова:** компрессорная решетка, наклон лопаток, вихревой метод, определение потерь.

### Введение

Одним из способов воздействия на радиальную структуру потока в осевой турбомашине является использование ступеней с лопатками, изогнутыми в окружном направлении, т.е. отклоненными от радиального направления на некоторый угол  $\delta$ . Этот угол может быть постоянным по всей высоте лопатки (наклонные лопатки), переменным по радиусу (изогнутые лопатки). Наклон или изогнутость могут быть по всей высоте лопатки или только на части ее высоты. Такие лопатки могут использоваться в неподвижных лопаточных венцах и/или рабочих колесах осевых турбомашин.

Заметный интерес к применению такого исполнения лопаток компрессорных ступеней связан с возможностью снижения в них потерь за счет радиальных перетеканий в пристеночных областях, изменения вторичных течений и реализации предпосылок снижающих отрыв потока. Это нашло подтверждение в целом ряде экспериментальных работ отечественных и зарубежных научных коллективов [1...10]. При этом в работах ХАИ и ЦИАМ показана возможность повышения коэффициента полезного действия (КПД) компрессорной ступени на 1...2% с наклонными и изогнутыми лопатками по сравнению с обычными радиальными ступенями [2, 3, 9].

### 1. Постановка задачи

Решение задачи расчета осесимметричного течения в лопаточной машине, хотя и позволяет определить параметры потока в ступени с наклонными лопатками, в силу известных приближений невязкого течения не дает возможности оценить величину потерь при использовании этого способа управления

поток. Требуется также некоторые уточнения при использовании изогнутых лопаток. На основе вихревого подхода предлагается теоретическое решение задачи о течении в компрессорной ступени с наклонными и изогнутыми лопатками. При этом изменение скоростей на профиле лопатки и стенки, диффузорности вблизи ограничивающей стенки позволяет выполнить оценку изменения величины потерь. Рассмотрим последовательно этапы решения.

**1.1. Изменение скоростей на профиле, обусловленное наклоном лопатки.** Поле скоростей вихревой трубки интенсивностью  $\Gamma$  определяется формулой [11]:

$$\bar{W} = \frac{\Gamma}{2\pi} \cdot \int \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^2}. \quad (1)$$

Уравнение (1) аналогично уравнению, выражающему закон Био-Савара в электродинамике. Этот закон устанавливает, что элемент вихревой нити напряжением  $\Gamma$  и длиной  $d\vec{l}$  индуцирует в точке  $M$  с координатами  $(x, y, z)$  скорость (рис. 1) направленную по нормали к плоскости, содержащей  $d\vec{l}$  и  $\vec{r}$ :

$$dW = \frac{\Gamma}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{\sin \alpha}{r^2} \cdot d\vec{l}, \quad (2)$$

где  $r$  – расстояние от элемента вихря до точки  $M$ ,  $\alpha$  – угол между радиус-вектором, проведенным из элемента в точку  $M$ , и направлением элемента вихря.

В случае прямолинейного вихря формула (2) приводится к виду  $dW = \frac{\Gamma}{4 \cdot \pi \cdot h} \cdot \sin \alpha \cdot d\vec{l}$ ,

где  $h$  – расстояние от точки  $M$  до вихревой нити.

Течение, обусловленное участком АВ вихревой нити (рис. 1) определяется формулой ( $\beta = \pi - \alpha_1$ ):

$$W = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{\tilde{A}}{4 \cdot \pi \cdot h} \cdot \sin \alpha \cdot d\alpha = \frac{\tilde{A}}{4 \cdot \pi \cdot h} \cdot (\cos \alpha_1 + \cos \beta), \quad (3)$$

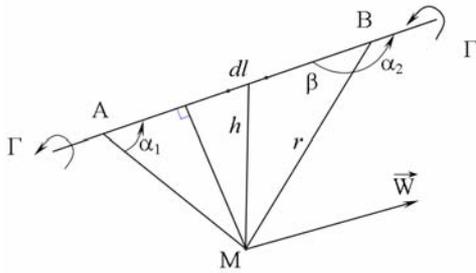


Рис. 1. К расчету скоростей на профиле наклонной лопатки

### 1.2. Вихревая имитация наклонной лопатки.

Течение вблизи угловой зоны имитируется полубесконечным вихрем, наклонным под углом  $\delta$  к плоскости  $y-z$  и его зеркальным отображением относительно плоскости  $x-z$  (рис. 2). Определим скорость в точке  $M$ , расположенной на оси  $x$  (на торцевой поверхности) и удаленной на расстояние  $h$  от оси вихря. Используя формулу (3) и учитывая, что  $\alpha_1 = \pi/2 - \delta$ ,  $\beta = 0$ , получим на оси  $x$  с учетом основного и отраженного вихрей

$$W_z = \frac{\Gamma}{2 \cdot \pi \cdot h} \cdot (\sin \delta + 1). \quad (4)$$

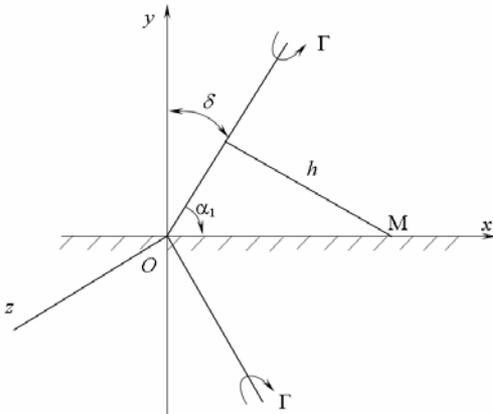


Рис. 2. Вихревая имитация наклонной лопатки

Формула (4) позволяет приблизительно сравнить скорости на поверхностях лопаток – наклонной  $W_z$  и радиальной ( $\delta = 0$ )  $W_{z0}$ . При наклоне лопатки корытцем к торцевой поверхности максимальная скорость на спинке лопатки вблизи угловой зоны уменьшается

$$W_{\max} / W_{\max 0} \approx 1 - \sin \delta. \quad (5)$$

Решетка наклонных лопаток, имитируемых вихрями интенсивности  $\Gamma$ , расположенных с шагом  $t$  вдоль оси  $x$  даст следующее значение  $W_z$ :

$$W_z \approx \frac{\tilde{A}}{2 \cdot \pi} \cdot (1 + \sin \delta) \cdot \sum_0^{\infty} \frac{1}{h + k \cdot t \cdot \cos \delta} - \frac{\tilde{A}}{2 \cdot \pi} \cdot (1 - \sin \delta) \cdot \sum_0^{\infty} \frac{1}{k \cdot t \cdot \cos \delta - h}. \quad (6)$$

Учитывая, что расстояние  $h$  имеет порядок толщины профиля, а, следовательно,  $h$  на порядок меньше  $t$ , получим приближенное соотношение

$$W_z \approx \frac{\tilde{A}}{2 \cdot \pi} \cdot (1 + \sin \delta) + \frac{\tilde{A}}{\pi \cdot t \cdot \cos \delta} \cdot \left( \sin \delta - \frac{h}{t \cdot \cos \delta} \right). \quad (7)$$

Анализ формулы (7) показывает, что вблизи угловой зоны скорость  $W_z$  достаточно близка определенной по формуле (4).

**1.3. Изменение степени диффузорности на спинке профиля.** Началу развития срыва потока на спинке профиля соответствует определенное значение степени диффузорности [12].

$$(D_w)_{\text{пр}} = \left( \frac{W_{\max}}{W_2} \right)_{\text{пр}} \approx 1,6 \dots 1,8. \quad (8)$$

Степень диффузорности определяет также толщину потери импульса в диффузорных решетках профилей. За счет изменения степени диффузорности (изменения  $W_{\max}$ ) возможно уменьшение потерь в компрессорной решетке и предотвращение отрыва потока.

В плоской решетке профилей циркуляция на лопатке приблизительно равна

$$\Gamma = \int_a^b (W_{\text{сп}} - W_{\text{кор}}) \cdot dx = t \cdot \Delta W_u. \quad (9)$$

Заменяя реальную эпюру скоростей на поверхности профиля треугольной, можно получить следующее соотношение между  $W_{\max}$  и  $W_1$ :

$$\frac{W_{\max}}{W_2} = 1 + a \cdot \frac{t}{b} \cdot \frac{\Delta W_u}{W_1}, \quad (10)$$

где поправочный коэффициент  $a \approx 0,5$  учитывает особенности реальной эпюры скоростей. Отсюда следует

$$D_w = \frac{W_{\max}}{W_2} \approx \frac{W_1}{W_2} \cdot \left( 1 + 0,5 \cdot \frac{t}{b} \cdot \frac{\Delta W_u}{W_1} \right). \quad (11)$$

## 2. Оценка влияния наклона лопаток на потери в пристеночной области

Представим вихревую схему лопатки в виде одиночного вихря, расположенного в плоскости  $XOY$ , нормальной оси компрессора. Такой вихрь будет индуцировать в точках этой плоскости скорости  $W_z$ , направленные вдоль оси  $z$  (оси компрессора). На рис. 3 представлена расчетная схема лопатки высотой  $h$ , средняя линия которой (ось вихря) очерчена радиусом  $R$  так, что у верхней и нижней торцевых поверхностей отклонение оси лопатки от вертикального направления составляет угол  $\delta$ . На одной из торцевых поверхностей отметим некоторую точку  $M$ , находящуюся на расстоянии  $h$  от касательной к средней линии лопатки, где  $h$  имитирует полутолщину профиля. Оценка величины скорости в точке  $M$  в зависимости от величины угла  $\delta$  позволяет сопоставить максимальные скорости на профиле для прямой лопатки и лопатки с криволинейной осью.

Алгоритм расчета может быть сведен к следующей последовательности:

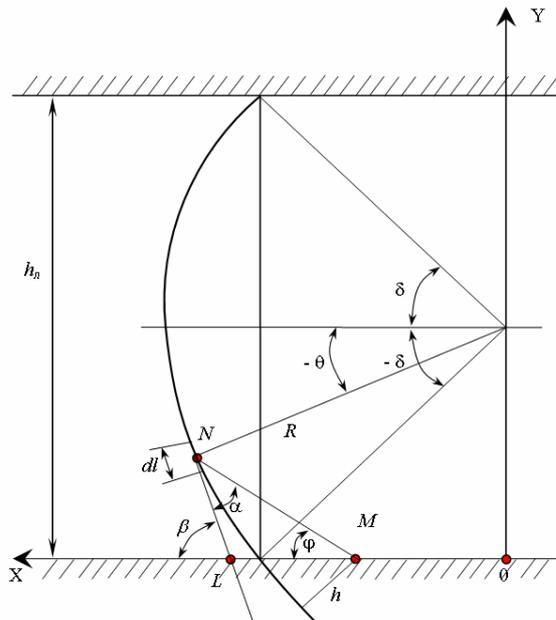


Рис. 3. К расчету течения в венце с изогнутой лопаткой

1) определяется радиус

$$R = \frac{h}{2 \cdot \sin \delta};$$

2) определяется координата точки М:

$$x_M = R \cdot \cos \delta - \frac{h}{\cos \delta}; \quad y_M = 0;$$

3) координаты точки N к учету интегрирования на отображенных вихрях

$$x_N = R \cdot \cos \vartheta; \quad y_N = \frac{h}{2} + R \cdot \sin \vartheta \cdot k \cdot h,$$

где  $k=1,2,3 \dots \infty$ ;

4) определяем угол

$$\alpha = \beta - \varphi,$$

где  $\beta = \pi / 2 + \vartheta$ ,  $\varphi = \arctg((y_N - y_M) / (x_N - x_M))$ ;

5) учитывая, что радиус  $r$  в формуле (2) соответствует длине отрезка MN, имеем

$$r = (y_N - y_M)^2 + (x_N - x_M)^2;$$

6) учтем также соотношение

$$dl = R d\theta.$$

Формула для расчета  $W_z$  в точке М в соответствии со схемой на рис. 3 может быть представлена в следующем виде

$$W_z = \frac{\Gamma \cdot R}{2 \cdot \pi} \cdot \int_{-\delta}^{\delta} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\sin \alpha}{r^2} d\vartheta. \quad (12)$$

Принимая, что на профиле вблизи от стенки имеем

$$\frac{W_{\max}}{W_{\max 0}} = \frac{W_z}{W_{z 0}},$$

можем оценить изменение степени диффузорности для пристеночных сечений, обусловленной наклоном лопатки с учетом (11) и (12):

$$D_W = D_{W 0} \cdot \frac{W_z}{W_{z 0}}. \quad (13)$$

Потери в решетке непосредственно зависят от толщины потери импульса на выходе [13]:

$$\zeta = \frac{2 \cdot \delta^{**}}{t \cdot \sin \beta_2} \cdot \frac{\sin^2 \beta_1}{\sin^2 \beta_2}, \quad (14)$$

где  $\zeta$  – коэффициент потерь. График изменения безразмерной толщины потери импульса от степени диффузорности представлен на рис. 4 [13].

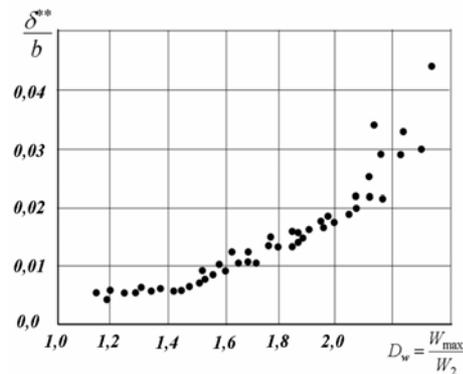


Рис. 4. Зависимость безразмерной толщины потери импульса от фактора диффузорности [13]

Эта кривая приближенно аппроксимируется формулой

$$\delta^{**} = 0,005 + 0,0235 \cdot (D_W - 1,2)^2. \quad (15)$$

Оценивая изменение величины  $\delta^{**}$  в зависимости от степени диффузорности, можно оценить и величину потерь (14).

### Заключение

Таким образом, на основе вихревого метода получено теоретическое решение о течении в компрессорной ступени с наклонными и изогнутыми лопатками, проанализировано изменение скоростей на профиле лопатки и степени диффузорности для потока вблизи ограничивающей стенки, позволяющее производить оценку изменения величины потерь.

### Литература

1. Аютин А.Н. Распространение возмущений, вызванных тангенциальным наклоном лопаток осевого компрессора / А.Н. Аютин, В.С. Дука // Самолетостроение. Техника воздушного флота. – 1986. – Вып. 53. – С. 6-9.
2. Брехов А.Ф. Исследование радиальной структуры течения в компрессорной ступени с наклонными лопатками направляющего аппарата / А.Ф. Брехов, Л.Н. Буслик, В.Н. Ершов, А.В. Скляр // Х.: Энергетическое машиностроение. – 1987. – Вып. 44. – С. 42-44.

3. Брехов А.Ф. Характеристика ступени осевого компрессора с наклонными лопатками / А.Ф. Брехов, Л.Н. Буслик, А.В. Скляр // Газовая динамика двигателей и их элементов. – 1987. – С. 57-60.

4. Брехов А.Ф. Окружной наклон лопаток в компрессорной ступени / А.Ф. Брехов, А.Е. Демин, А.В. Скляр // Газовая динамика двигателей и их элементов. – 1987. – С. 60-65.

5. Богод А.Б. Повышение КПД дозвуковой ступени осевого компрессора посредством применения направляющего аппарата с пространственной формой лопаток / А.Б. Богод, А.М. Петровичев и др. // Научн. техн. отчет ЦИАМ № 11220, 1988. – 96 с.

6. Брусиловский И.В. Исследование возможностей повышения КПД осевого вентилятора за счет снижения потерь давления в специальном спрямляющем аппарате / И.В. Брусиловский, С.А. Исакович и др. // Научн.-техн. отчет ЦАГИ, №12160, 1988. – 123 с.

7. Савин Н.М. Экспериментальное исследование влияния формы изогнутости лопаток направляющего аппарата в окружном направлении на характеристики ступени осевого компрессора /

Н.М. Савин, А.М. Петровичев // Научн. техн. отчет ЦИАМ № 11518. – М., 1988. – 108 с.

8. Терещенко Ю.Н. Аэродинамическое совершенствование лопаточных аппаратов компрессоров / Ю.Н. Терещенко. – М.: Машиностроение, 1988. – 168 с.

9. Кампсти Н. Аэродинамика компрессоров: пер. с англ. / Н. Кампсти – М.: Мир, 2000. – 688 с.

10. Бойко А.В. Аэродинамический расчет и оптимальное проектирование проточной части турбомашин: монография / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко, С.В. Еришов, А.В. Русанов, С.Д. Северин. – Х.: НТУ «ХПИ», 2002. – 356 с.

11. Борисенко А.И. Газовая динамика двигателей / А.И. Борисенко. – М.: Оборонгиз, 1968. – 794 с.

12. Нечаев Ю.Н. Теория авиационных газотурбинных двигателей; Т.1 / Ю.Н. Нечаев, Р.М. Федоров. – М.: Машиностроение, 1977. – 312 с.

13. Холщевников К.В. Теория и расчет авиационных лопаточных машин / К.В. Холщевников, О.Н. Емин, В.Т. Митрохин. – М.: Машиностроение, 1986. – 432 с.

Поступила в редакцию 14.05.2008

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой 203 С.В. Епифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

### ОЦІНКА ВЕЛИЧИНИ ВТРАТ В КОМПРЕСОРНИХ ГРАТКАХ З ЛОПАТКАМИ, ЩО Є ПОХИЛИМИ АБО ЗАГНУТИМИ В ОКРУЖНОМУ НАПРЯМКУ

*А.М. Анютин, Л.М. Буслик, О.Г. Волов, О.Є. Дьомін*

На основі вихрового підходу запропоновано теоретичне розв'язання задачі про течію в компресорному ступені з лопатками, що є похилими або загнутими в окружному напрямку. Наведені етапи розв'язання задачі. Розглянуто зміну швидкостей потоку на профілі, що обумовлена нахилом лопатки. Проведена оцінка зміни ступеня дифузортності на спинці профілю, а також для потоку поблизу обмежувачої стінки. На основі представлення вихрової схеми лопатки у вигляді одиночного вихору, розташованого в площині, що є нормальною до осі компресора, запропоновано підхід до оцінки впливу нахилу лопаток на втрати в пристінковій області в компресорному ступені з лопатками, що є похилими або загнутими в окружному напрямку.

**Ключові слова:** компресорна гратка, нахил лопаток, вихровий метод, визначення втрат.

### LOSSES ESTIMATION IN THE COMPRESSOR GRID WITH SLOPING OR BENT IN CIRCUITOUS DIRECTION SHOULDER-BLADES

*A.N. Anutin, L.N. Booslik, A.G. Volov, A.E. Dyomin*

On the basis of vortex approach the theoretical solution of the flowfield in the compressor stage with the sloping and bent shoulder-blades is offered. Task decision stages are presented. The sloping shoulder-blade vortex imitation is executed. of suction surface diffusion degree change Estimation is conducted, and also for flow near the limiting wall. On the basis of vortex chart of shoulder-blade as a single whirlwind presentation, which is located in plane, normal to the axis of compressor, estimation of influencing of inclination of shoulder-blades on the losses in the near wall region in the compressor stage with the sloping and bent shoulder-blades approach is offered.

**Key words:** compressor grid, inclination of shoulder-blades, vortex approach, losses determination.

1. **Анютин Анатолий Никитич** канд. техн. наук, доцент, доцент, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

2. **Буслик Леонид Николаевич** канд. техн. наук, доцент, доцент, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

3. **Волов Александр Геннадиевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

4. **Демин Александр Евгеньевич** канд. техн. наук, ст.научн. сотрудник, ст.научн. сотрудник, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.