

2. Меркулов А.П.: Вихревой эффект и его применение в технике. - М.: Машиностроение, 1969.
3. Мартынов А.П., Бродянский В.М. Что такое вихревая труба? - М.: Энергия, 1976.
4. Бузник В.М. Интенсификация теплообмена в судовых установках. - Л.: Судостроение, 1969.

УДК 533.6

К.Б.Немира, А.В.Мартынов

МЕТОД РАСЧЕТА ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ В НАЧАЛЬНЫХ СЕЧЕНИЯХ ВИХРЕВОЙ КАМЕРЫ

П р и н я т ы е о б о з н а ч е н и я

α - угол между абсолютной скоростью потока в вихревой камере и осью камеры; β, γ - углы между скоростью газа в завихрителе и, соответственно, осью вихревой камеры и касательной к окружности радиуса r_c ; ϵ - коэффициент сохранения начального момента вращения.

И н д е к с ы

T и Q - тангенциальное и осевое направления; 1 и 2 - средние параметры газа на выходе из завихрителя и периферийного потока в вихревой камере; c, k, m - параметры на среднем радиусе завихрителя, на радиусе вихревой камеры и на радиусе максимальной тангенциальной скорости.

При описании поля скоростей возникают затруднения в решениях перехода от прямолинейного течения газа в соплах завихрителя к закрученному в вихревой камере (ВК).

В предлагаемом методе процесс формирования закрученного потока рассматривается как втекание в ВК турбулентной струи газа, которая образует периферийный закрученный поток. Вихревое ядро, закручиваемое периферийным потоком, вследствие вынужденности движения вращается по закону, близкому к $W_T/r = const$. Непосредствен-

но в сопловом сечении и в конце вихревого ядра из-за существенных радиальных скоростей газа вихревое ядро вращается по закону, отличающемуся от закона квазитвердого вихря, с показателем степени при радиусе, соответственно, больше и меньше единицы [1].

Опытные данные [1, 2, 3] показывают, что в вихревых потоках имеются радиус максимальной тангенциальной скорости r_m и радиус r_a , на котором осевая скорость меняет знак своего направления. Зона между r_m и r_a является пограничным слоем периферийного потока и, в основном, заполнена подсосываемым из вихревого ядра потоком газа. В дальнейшем радиус r_m будем считать внутренним радиусом периферийного потока.

При определении поля скоростей основными моментами являются выявление границ периферийного потока, закономерностей распределения скоростей газа и связи между скоростями газа на выходе из завихрителя и в закрученном потоке.

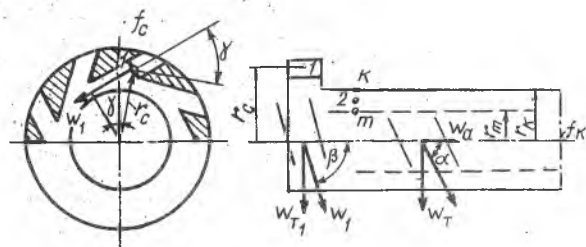
Для теоретической модели принимаются следующие допущения: распределение параметров газа в периферийном потоке соответствует адиабатному процессу в ВК, при котором в результате взаимодействия периферийного и присосового потоков устанавливается равенство статических энтальпий по радиусу;

абсолютная скорость газа в периферийном потоке постоянна по радиусу;

тангенциальные составляющие массовой скорости ρW_T струи на выходе из завихрителя и в периферийном закрученном потоке равны между собой;

течение осесимметричное по цилиндрическим поверхностям.

Расчетная схема представлена на рис. 1.



Р и с. 1. Расчетная схема

Из совместного решения дифференциальных уравнений сохранения энергии и уравнения радиального равновесия можно получить дифференциальное уравнение вращения периферийного потока:

$$\sin^2 \alpha \frac{dr}{r} + \frac{dW_T}{W_T} + \frac{d(\sin \alpha)}{\sin \alpha} = 0. \quad (1)$$

Интегрирование (1) дает закон вращения периферийного потока, а с учетом постоянства абсолютной скорости - и закон распределения углов закрутки по радиусу:

$$\sin^2 \alpha \cdot r^{\sin^2 \alpha} = \text{const}. \quad (2)$$

Так как в уравнении (1) имеются три переменных, то для упрощения расчетов и последующих преобразований введем среднюю величину

$$(\sin \alpha)_{cp} = \int_{r_m}^{r_k} \frac{\sin \alpha \cdot dr}{r_k - r_m}. \quad (3)$$

Тогда при интегрировании (1) получим идеализированный закон вращения винтового потока:

$$W_T r^{(\sin^2 \alpha)_{cp}} = W_T r^n = \text{const}. \quad (4)$$

Сохраняя структуру формулы (2), примем также идеализированный закон распределения углов закрутки, который достаточно хорошо согласуется с опытными данными:

$$\sin^2 \alpha \cdot r^n = \text{const}. \quad (5)$$

Уравнение (5), записанное для граничных условий,

$$\sin^2 \alpha \cdot r^n = \sin^2 \alpha_m r_m^n = \sin^2 \alpha_k r_k^n \quad (6)$$

позволяет с помощью уравнения (3) и с учетом $\sin^2 \alpha_m \approx 1$ найти выражение между относительным радиусом периферийного потока $x = r_m/r_k$ и показателем степени n :

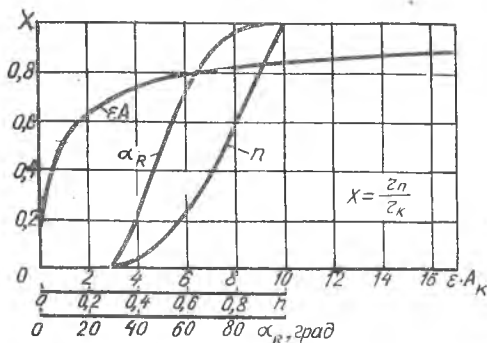
$$\frac{x^n [1 - x^{(1-0,5n)}]^2}{n(1-0,5n)^2 (1-x)^2} = 1. \quad (7)$$

Уравнение (7) является трансцендентным и решение его представлено на рис. 2 в виде зависимости n от x .

Из уравнения (6) получаем выражение для величины угла закрутки потока около стенки ВК:

$$\sin^2 \alpha_k = x^n. \quad (8)$$

Для определения относительного радиуса X используется гипотеза, по которой внутренняя граница периферийного потока при заданном перепаде давления занимает положение, обеспечивающее максимум потока кинетической энергии



Р и с. 2. Характеристики периферийного потока в BK

$$dE = d \left[\int_{r_m}^{r_k} 2\pi r dr \rho W_a \left(\frac{W_T^2}{2} + \frac{W_a^2}{2} \right) \right] = 0. \quad (9)$$

Для упрощения конечных формул и расчетов введем (только в преобразованиях) среднюю плотность ρ_2 и среднюю осевую скорость в периферийном потоке. Из уравнения расхода газа

$$W_{a2} = W_1 \frac{\rho_1 \cdot f_c}{\rho_2 \cdot f_k} \frac{1}{(1-x^2)}. \quad (10)$$

Величину текущей тангенциальной скорости W_T можно найти с помощью уравнения (4) через значение тангенциальной скорости W_{Tm} на границе периферийного потока.

Для определения W_{Tm} используется коэффициент сохранения начального момента скорости ε :

$$\varepsilon = \frac{\rho_2 W_{Tm} r_m}{\rho_1 W_T r_c} = \frac{\rho_2 W_{Tm} X}{\rho_1 W_1 q \sin \beta \cos \gamma}, \quad (11)$$

где $q = r_c / r_k$.

Дифференцируя уравнение (9) по X и приравнявая производную нулю, получим уравнение, связывающее величину относительного радиуса периферийного потока X с геометрическими соотношениями BK:

$$(\varepsilon A_K)^2 = \frac{(2-2n) X^{3-2n}}{(1-X^2)^2 (1-X^{2-2n}) \left[\frac{1-n}{X} + \frac{(1-n) X^{1-2n}}{(1-X^{2-2n})} - \frac{X}{1-X^2} \right]}, \quad (12)$$

где A_K - геометрическая характеристика BK,

$$A_k = f_k q \sin \beta \cos \gamma / f_c . \quad (13)$$

Решение уравнения (12) представлено на рис. 2. При расчетах учитывалась связь между n и x по уравнению (7).

При определении поля скоростей коэффициент ε обычно определяют по эмпирическим зависимостям [3]. Для аналитического определения используется третье допущение, т.е.

$$\rho_1 W_{T1} = \rho_2 W_{T2} . \quad (14)$$

Тангенциальная скорость газа на границе периферийного потока определяется с помощью уравнения (4).

$$W_{Tm} = \frac{W_{T2} r_2^n}{r_m^n} = \frac{\rho_1}{\rho_2} W_s \sin \beta \cos \gamma \frac{1}{x^n} \left(\frac{1+x^2}{2} \right)^{0,5n} , \quad (15)$$

$$\text{где } r_2 = \sqrt{\frac{r_k^2 + r_m^2}{2}} .$$

Подставляя значение W_{Tm} в уравнение (11), получим аналитическое выражение для коэффициента сохранения момента скорости:

$$\varepsilon = x^{1-n} \left(\frac{1+x^2}{2} \right)^{0,5n} . \quad (16)$$

Распределение тангенциальных скоростей по радиусу в периферийном потоке определяется по уравнению (4), а осевых скоростей - по уравнению

$$W_a = \sqrt{W_{r2}^2 + W_{a2}^2 - W_r^2} \approx \sqrt{W_{Tm}^2 - W_r^2} . \quad (17)$$

Таким образом, получена замкнутая система уравнений без привлечения эмпирических зависимостей. Задача определения поля скоростей в периферийном потоке решается методом последовательных приближений. В качестве первого приближения коэффициент ε принимается равным единице.

Обычно при расчете ВК известны ее геометрические соотношения и перепад давления. Для расчета скорости газа W_r надо знать давление газа на выходе из завихрителя, которое зависит от конструкции ВК. При расчете ВК с диафрагмой в сопловом сечении давление можно определить по методике [4].

Сопоставление с опытными данными [3] показывает, что рассмотренный метод расчета достаточно хорошо описывает поле скоростей в начальных сечениях ВК.

Л и т е р а т у р а

1. М а р т ы н о в А.В., Б р о д ь я н с к и й В.М. Что такое вихревая труба? - М.: Энергия, 1976, 152 с.
2. М е р к у л о в А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. - М.: Машиностроение, 1969, 175 с.
3. Циклонные топки. Под ред. Г.Ф.Кнорре и М.А.Наджарова. -М.-Л.: Госэнергоиздат, 1958, 216 с.
4. М а р т ы н о в А.В., Н е м и р а К.Б. Труды МЭИ, 1977, вып. 318, с. 70-74.