

Простой метод расчета потерь во входном радиально-осевом конфузоре центробежной ступени

Л.К. Чернявский (ЗАО «НПФ «Невинтермаш»)

Предложен простой приближенный метод расчета потерь во входном радиально-осевом конфузоре центробежной ступени. Метод базируется на экспериментальных данных гидравлики по потерям в криволинейных каналах и приеме вычисления составляющих суммарных потерь по средним величинам геометрических параметров конфузора и среднеквадратичной расходной скорости потока в нем.

Ключевые слова: центробежная ступень, входной конфузор, расчет потерь, средние геометрические параметры, среднеквадратичная расходная скорость.

A rapid method for calculation of losses in inlet radial-axial confuser of centrifugal stage

L.K. Chernyavsky

Very simple approximate method proposed, which is based on experimental hydraulic data about losses in curved channels and an idea to calculate losses by using middle geometrical parameters of the confuser and mid-square average flow velocity in it.

Keywords: centrifugal stage, inlet confuser, calculation of losses, middle geometrical parameters, mid-square average flow velocity.

Входному радиально-осевому конфузору центробежной ступени (рис. 1) присущи следующие особенности: осесимметричность геометрии и потока; плавная дуговая форма обоих меридиональных обводов; конфузорный характер течения; отсутствие вторичных токов и окружной составляющей скорости; малые числа Маха; большие числа Рейнольдса. Эти геометрические и газодинамические особенности позволяют предложить очень простой метод расчета потерь в рассматриваемом элементе проточной части ступени.

Метод базируется на обобщенных экспериментальных данных по потерям в криволинейных каналах и на приеме вычисления составляющих суммарных потерь по средним значениям геометрических параметров конфузора и среднеквадратичной расходной скорости потока в нем.

Согласно предлагаемому методу, потери h в конфузоре представляются в виде суммы потерь трения $h_{тр}$ и потерь $h_{пов}$, обусловленных поворотом потока на 90° из радиального направления в осевое:

$$h = h_{тр} + h_{пов} \quad (1)$$

Конфузорные потери не учитываются, так как в соответствии с многочисленными экспериментальными данными (например, [1]) при отсутствии в любом конфузоре канале изломов стенок они пренебрежимо малы по сравнению с $h_{тр}$. Учитывать диффузорные потери как отдельную составляющую нет необходимости, поскольку в рассматриваемом конфузоре нет ни одного диффузорного участка, а диффузорные потери в местных диффузорных зонах на выпуклом и вогнутом обводах, являющиеся следствием поворота потока, входят в $h_{пов}$.

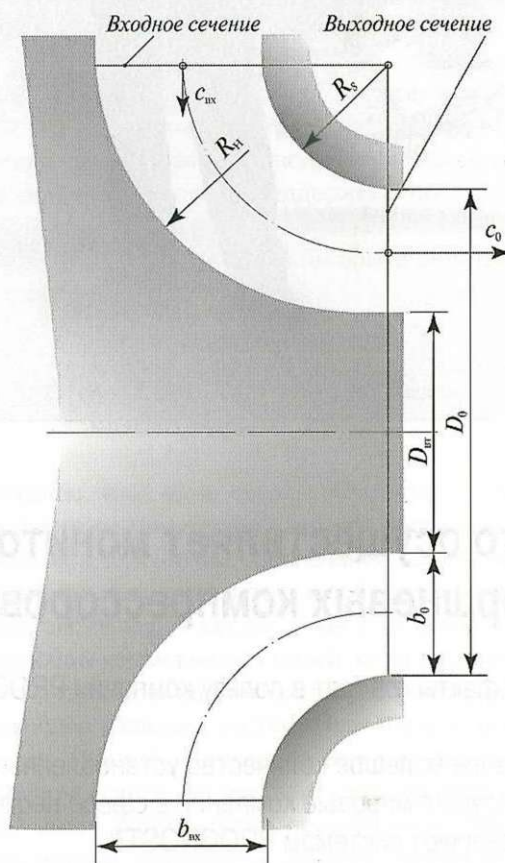


Рис. 1. Входной радиально-осевой конфузор центробежной ступени

Первое слагаемое в выражении (1) рассчитывается по формуле

$$h_{тр} = \lambda(L/d_{г.ср})(c_{ср.кв}^2/2), \quad (2)$$



где λ – средний коэффициент трения в конфузоре; L – длина средней линии меридионального профиля конфузора (рис. 2); $d_{г.ср}$ – средний гидравлический диаметр; $c_{ср.кв}$ – среднее квадратичное значение расходной скорости.

Если допустить, что пограничные слои на входе в конфузор такие же, как развитый пограничный слой в прямой трубе, то коэффициент трения λ определяется решением известного уравнения Коулбрука [1]

$$\lambda^{-0.5} = 1,74 - 21g(2 \bar{k}_{ш.ср} + 18,7Re^{-1} \lambda^{-0.5}), \quad (3)$$

где $\bar{k}_{ш.ср}$ и $Re_{ср}$ – средняя относительная шероховатость и число Рейнольдса, рассчитываемые по диаметру $d_{г.ср}$:

$$\bar{k}_{ш.ср} = k_{ш}/d_{г.ср}; \quad (4)$$

$$Re_{ср} = c_{ср} d_{г.ср} / \nu; \quad (5)$$

$k_{ш}$ – абсолютная шероховатость стенок; $c_{ср}$ – средняя расходная скорость в конфузоре; ν – кинематическая вязкость газа.

Скорость $c_{ср}$ с достаточной точностью может быть определена по значениям расходной скорости во входном, выходном и некотором промежуточном сечениях конфузора:

$$c_{ср} = (c_{вх} + 2c_{пром} + c_0)/4.$$

При расчете и профилировании конфузора заданными параметрами являются обычно скорость c_0 и диаметры выходного сечения D_0 и $D_{вт}$. Поэтому и с учетом низкого уровня чисел Маха скорости $c_{вх}$ и $c_{пром}$ вычисляются по скорости c_0 и отношениям площадей f соответствующих сечений:

$$c_{вх} = c_0(f_0/f_{вх});$$

$$c_{пром} = c_0(f_0/f_{пром}),$$

$$\text{где } f_0 = \pi(D_0^2 - D_{вт}^2)/4; f_{вх} = \pi D_{вх} b_{вх} = \pi(D_0 + 2R_s) b_{вх};$$

$$f_{пром} = \pi D_{пром.ср} b_{пром}. \quad (6)$$

Для использования последнего равенства необходимо условиться, какое именно сечение конфузора понимается под промежуточным сечением. В качестве такового естественно принять сечение, ориентированное под углом 45° к оси конфузора и расположенное между двумя аналогично ориентированными сечениями, одно из которых проходит через центр дуги радиусом R_H , а другое – через центр дуги радиусом R_s (рис. 2). В этом случае

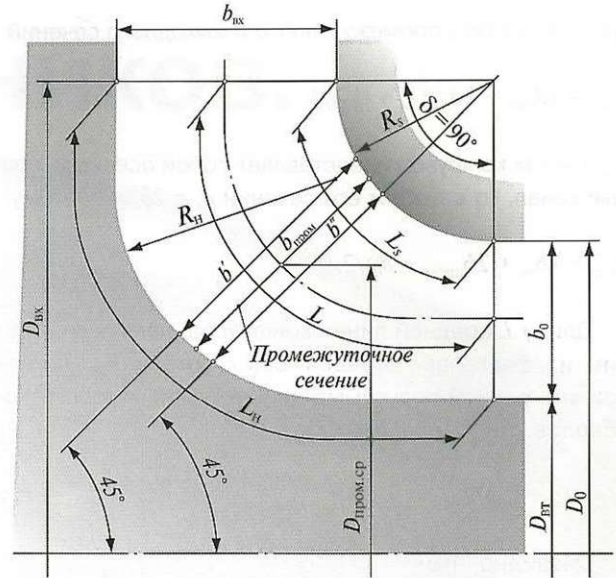


Рис. 2. Меридиональный профиль конфузора

$$b_{пром} = (b' + b'')/2.$$

Величины b' и b'' могут быть измерены по чертежу рассчитываемого конфузора. Но можно воспользоваться следующими аналитическими выражениями, полученными из тригонометрических соотношений после необходимых геометрических построений:

$$b' = \sqrt{Q^2 + P^2} \cos\left(\arctg \frac{Q}{P} - 45^\circ\right) - \sqrt{R_s^2 - (Q^2 - P^2) \left[1 - \cos^2\left(\arctg \frac{Q}{P} - 45^\circ\right)\right]} - 0,414 R_H;$$

$$b'' = \sqrt{M^2 + N^2 + R_H^2 - 2R_H \sqrt{M^2 + N^2}} \times \cos\left[135^\circ + \arctg \frac{N}{M} - \arcsin \left[\frac{\sqrt{M^2 + N^2}}{R_H} \times \sin\left(45^\circ - \arctg \frac{N}{M}\right) \right]\right] - R_s.$$

В этих выражениях $P = R_s + b_0$; $Q = R_s + b_{вх}$; $M = R_s + b_{вх} - R_H$; $N = R_s + b_0 - R_H$.

Для фигурирующего в формуле (6) среднего диаметра промежуточного сечения $D_{пром.ср}$ также получено аналитическое выражение:

$$D_{пром.ср} = (D_0 + D_{вт})/2 + 0,293(R_s + R_H) + 0,707(b' - b'').$$

Средний гидравлический диаметр $d_{г.ср}$, необходимый для вычислений $Re_{ср}$ по формуле (5), $\bar{k}_{ш.ср}$ по формуле (4) и $h_{тр}$ по формуле (2), находится усреднением диаме-

тра d_r входного, промежуточного и выходного сечений:

$$d_{r,ср} = (d_{r,вх} + 2d_{r,пром} + d_{r0})/4.$$

Так как конфузор представляет собой осесимметричный канал, то в любом его сечении $d_r = 2b$, и поэтому

$$d_{r,ср} = (b_{вх} + 2b_{пром} + b_0)/2.$$

Длину L средней линии конфузора, являющуюся одним из факторов, определяющих потери $h_{тр}$, логично принять равной полусумме длин выпуклого и вогнутого обводов конфузора L_s и L_n :

$$L = (L_s + L_n)/2. \quad (7)$$

Очевидно, что

$$L_s = \pi R_s/2. \quad (8)$$

Нетрудно показать, что

$$L_n = 2R_s + b_0 + b_{вх} - 0,43R_n. \quad (9)$$

При подстановке выражений (8) и (9) в формулу (7) получим

$$L = 1,785R_s + 0,5b_0 + 0,5b_{вх} - 0,215R_n.$$

Потери $h_{тр}$ зависят также от скорости $c_{ср,кв}$. Методические расчеты показали, что вполне допустимо принять ее как среднеквадратичное значение расходных скоростей во входном, промежуточном и выходном сечениях конфузора, т.е.

$$c_{ср,кв} = \sqrt{(c_{вх}^2 + 2c_{пром}^2 + c_0^2)/4}.$$

Вторую составляющую потерь в конфузоре $h_{пов}$ предлагается определять способом, в принципе аналогичным способу, принятому в гидравлике для криволинейных каналов с неизменяющимся по ходу потока поперечным сечением. Отличие состоит в том, что в расчетное выражение для $h_{пов}$ рассматриваемого конфузора вместо расходной скорости подставляется ее среднеквадратичное значение:

$$h_{пов} = A(\delta)B(\bar{R}_{ср})C(a/b)K(Re)K(\bar{k}_{ш})(c_{ср,кв}^2/2), \quad (10)$$

где $A(\delta)$ – функция угла поворота; $B(\bar{R}_{ср})$ – функция относительного среднего радиуса кривизны; $C(a/b)$ – функция отношения высоты сечения a к ширине сечения b ; $K(Re)$ – поправочный коэффициент на число Re ;

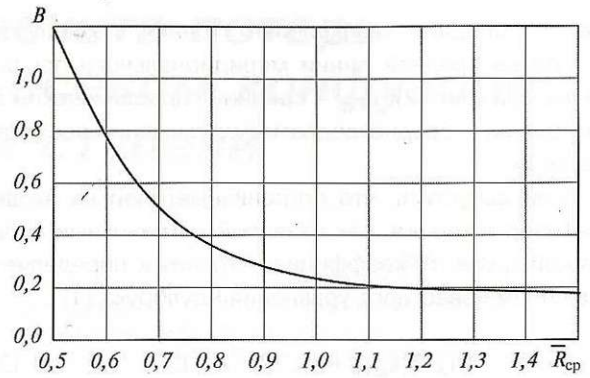


Рис. 3. Зависимость $B = f(\bar{R}_{ср})$ [1]

$K(\bar{k}_{ш})$ – поправочный коэффициент на относительную шероховатость.

В рассматриваемом криволинейном осесимметричном конфузоре $\delta = 90^\circ$, $a/b = \infty$, $Re > 2 \cdot 10^5$, $\bar{k}_{ш} = 0 \dots 0,001$. Поэтому согласно работе [1] $A(\delta) = 1$, $C(a/b) = 1$, $K(Re) = 1$, $K(\bar{k}_{ш}) \approx 1$. Следовательно, выражение (10) радикально упрощается и приобретает вид

$$h_{пов} = B(\bar{R}_{ср})(c_{ср,кв}^2/2).$$

Величина фигурирующей здесь функции $B(\bar{R}_{ср})$ принимается по рис. 3, заимствованному из работы [1]. Зависимость на рис. 3 с погрешностью в несколько процентов аппроксимируется формулой

$$B = 0,01 / (\bar{R}_{ср}^{0,04} + 0,002). \quad (11)$$

Относительный средний радиус кривизны конфузора $\bar{R}_{ср}$, необходимый для того, чтобы воспользоваться графиком на рис. 3 или формулой (11), вычисляется следующим образом:

$$\bar{R}_{ср} = R_{ср}/b_{ср} = (R_s + b_{ср}/2)/b_{ср} = (R_s/b_{ср}) + 0,5,$$

где $b_{ср} = (b_{вх} + 2b_{пром} + b_0)/4$.

Таким образом, определение потерь h во входном радиально-осевом конфузоре может быть сведено к простым вычислениям по формулам и решению одного трансцендентного уравнения (3). Не требуются ни расчеты течения рабочей среды, ни вычисления и суммирование потерь на многочисленных коротких отрезках конфузора, на которые он должен разбиваться в известном методе [2].

Список литературы

1. Справочник по расчетам гидравлических и вентиляционных систем. СПб.: АНО НПО «Мир и семья», 2002.
2. Чернявский Л.К. Оценочный метод расчета потерь в кривоосных каналах сложной формы // Повышение эффективности холодильных машин и установок низкопотенциальной энергетики. СПб.: Международная академия холода, 1993.

