

С.В.Карпов, Э.Н.Сабуров

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ГАЗОВ В ВЫХОДНОМ ОТВЕРСТИИ  
И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ВИХРЕВЫХ УСТРОЙСТВ

(Архангельский лесотехнический институт)

Представлены результаты экспериментального исследования и анализа течения потока в выходном отверстии вихревого устройства при варьировании безразмерного диаметра выходного отверстия. Предложена схема расчета распределений тангенциальной скорости, даны рекомендации по определению радиусов характерных зон вихревого потока. На основе однопараметрической модели осесимметричного циркуляционного течения получено расчетное выражение для аксиальной скорости в приосевой зоне. Приведены данные о расходных характеристиках вихревого устройства в широком диапазоне параметра  $d_{вх}$ .

Совершенствование конструкций вихревых аппаратов и повышение их энергетической эффективности тесно связано с изучением характера движения газов в выходном отверстии и способов управления их аэродинамикой, основанных на изменении условий вывода газов [1-3].

В настоящее время практически отсутствуют экспериментальные данные по течению газов непосредственно в переходе [4]. Цель данного исследования — изучение закономерностей закрученного потока в выходном отверстии вихревого аппарата, определение радиальных размеров характерных зон, создание методики расчета аэродинамических и расходных характеристик течения. С опыты выполнены на модельной установке при варьировании безразмерной площади входа  $f_{вх} = 4f_{вх}/(\pi D_K^2) = 0,0477 \dots 0,1956$  ( $D_K = 2R_K$  — внутренний диаметр устрой-

ISBN 5-230-16926-5

Вихревой эффект  
и его применение в технике.  
Самара, 1992

ва) и безразмерного диаметра выходного отверстия  $\bar{d}_{\text{вих}} = d_{\text{вих}}/D_K = 0,048 \dots 1,0$ .

Установлено существование во всем исследованном интервале изменения  $\bar{d}_{\text{вих}}$  зон: осевого и обратного течения, ограниченно-го радиусом  $z_{\text{во}}$ , кольцевого выходного вихря шириной  $z_{\text{вих}} - z_{\text{во}}$  и характеризуемого максимальным значением аксиальной скорости  $V_{z\text{м}}^{\text{вих}}$ , достигаемым на радиусе  $z_{z\text{м}}$ , разрежения (отрицательных значений избыточного статического давления  $P_c$ ), определяемого радиусом  $z_{p0}$ . Избыточное полное давление  $P_n$  в пределах осевого обратного потока также отрицательно, причем минимум его наблюдается на радиусе  $z_{\text{во}}$ , а нулевое значение — на  $z_{\text{но}}$ .

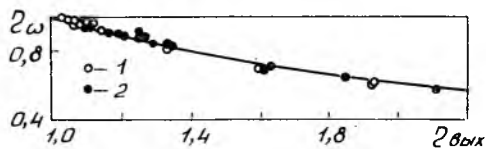
Анализ распределений тангенциальной скорости в переходе показал, что радиальный профиль  $V_\tau$  характеризуется малой степенью заполнения, уменьшающейся с увеличением  $\bar{d}_{\text{вих}}$ . Это обусловлено влиянием подсосываемого извне незакрученного осевого обратного потока и его взаимодействием с кольцевым обратным вихрем. Зависимость безразмерной тангенциальной скорости  $\bar{\omega} = V_\tau/V_{\tau\text{м}}^{\text{вих}}$  от текущего радиуса  $\eta = z/z_{z\text{м}}$  в ядре течения (при  $0 \leq \eta \leq 1$ ) удовлетворительно описывается аппроксимацией вида [4]

$$\bar{\omega} = [2\eta/(1+\eta^2)]^{n_\omega}, \quad (1)$$

где  $n_\omega$  — показатель степени, определяемый из условия существования максимума угловой скорости вращения газа  $\bar{\omega} = \bar{\omega}/\eta$  на радиусе  $\eta_\omega$ :

$$n_\omega = \frac{1+\eta_\omega^2}{1-\eta_\omega^2}. \quad (2)$$

По опытным данным характерный радиус  $\eta_\omega$  в сечении выхода определяется только величиной безразмерного радиуса  $\eta_{\text{вих}} = z_{\text{вих}}/z_{z\text{м}}^{\text{вих}}$  (рис. 1). Приближенную аналитическую связь  $\eta_\omega$  с  $\eta_{\text{вих}}$  можно получить, воспользовавшись уравнением движения свободно-вихревого потока в проекции на осевое направление. Решение дифференциального уравнения имеет вид



Р и с. 1. Зависимость безразмерного радиуса  $\eta_\omega$  от степени дифрагмирования  $\eta_{\text{вих}}$ : 1 — опытные точки авторов, 2 — опытные точки Неджима, Пеню, Сайреда, Сахатимера, Стайлса, Б. П. Устименко, Г. В. Якубова, линия — расчет по уравнению (6)

$$\bar{\omega}_m = C_1 \ln \eta_{\text{вых}} + C_2, \quad (3)$$

где  $\bar{\omega}_m$  - максимальное значение  $\bar{\omega}$  выраженное из соотношения (1) и (2):

$$\bar{\omega}_m = \frac{1}{\eta_{\omega}} \left( \frac{2\eta_{\omega}}{1 + \eta_{\omega}^2} \right) \frac{1 + \eta_{\omega}^2}{1 - \eta_{\omega}^2} = \frac{2}{1 + \eta_{\omega}^2}$$

$C_1$  и  $C_2$  - постоянные интегрирования, находимые из граничных условий задачи:

$$\begin{aligned} \text{при } \eta_{\text{вых}} &= 1 & \eta_{\omega} &= 1 \\ \text{при } \eta_{\text{вых}} &= 1,5 & \eta_{\omega} &= 0,75. \end{aligned} \quad (4)$$

Второе граничное условие принято по опытным данным исходя из особенностей решения (3) и для его наилучшего согласования с экспериментом. При подстановке (4) в (3) получено расчетное выражение

$$\eta_{\omega} = 2 / (1 + 0,35 \ln \eta_{\text{вых}}) - 1, \quad (5)$$

описывающее опытные данные авторов и других исследователей (см. рис. 1).

Установлена практически линейная и единообразная связь безразмерных радиусов  $\bar{\varepsilon}_{\text{Эт}}^{\text{вых}}$ ,  $\bar{\varepsilon}_{\text{Эт}}^{\text{вых}}$ ,  $\bar{\varepsilon}_{\text{Эт}}$ ,  $\bar{\varepsilon}_{\text{Эт}}$  с диаметром перетяжки при  $d_{\text{вых}} < 0,7$ . Общий вид зависимости характерных радиусов от  $d_{\text{вых}}$  описывается уравнением

$$\bar{\varepsilon}_x = a + b d_{\text{вых}} + c \exp(e d_{\text{вых}}), \quad (6)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $e$  - численные коэффициенты, приведенные в таблице.

$\bar{\varepsilon}_x$	$a$	$b$	$c$	$e$
$\bar{\varepsilon}_{\text{Эт}}^{\text{вых}}$	-0,02	0,98	$7,7 \cdot 10^{-4}$	3,66
$\bar{\varepsilon}_{\text{Эт}}$	-0,02	0,98	$7,7 \cdot 10^{-4}$	3,66
$\bar{\varepsilon}_{\text{Эт}}$	-0,02	0,835	$5,675 \cdot 10^{-6}$	10,0
$\bar{\varepsilon}_{\text{Эт}}$	-0,028	0,74	$10^{-4}$	6,0

Зависимость  $\bar{v}_{\text{во}}$  от  $d_{\text{вих}}$  можно найти, зная закон распределения  $\bar{u}$  в присосевой зоне.

Воспользовавшись однопараметрической моделью осесимметричного циркуляционного потока (при пренебрежении радиальной составляющей скорости и с учетом того, что для большей части присосевого течения  $dP_n/dz = 0$ ), запишем уравнение движения в следующей безразмерной форме:

$$\frac{1}{\eta} \left( \frac{2\eta}{1+\eta^2} \right)^{n\omega} \frac{d}{d\eta} \left[ \left( \frac{2\eta}{1+\eta^2} \right)^{n\omega} \eta \right] + \bar{u} \frac{d\bar{u}}{d\eta} = 0, \quad (7)$$

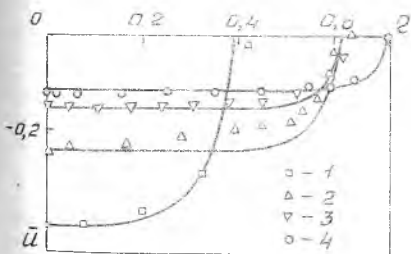
где  $\bar{u} = V_z / V_{z\text{м}}$  - относительная аксиальная скорость.

После разделения переменных и интегрирования получим закон распределения  $\bar{u} = \bar{u}(\eta)$  в диапазоне  $0 \leq \eta \leq \eta_{\text{во}} = 2v_{\text{во}} / v_{z\text{м}}$ :

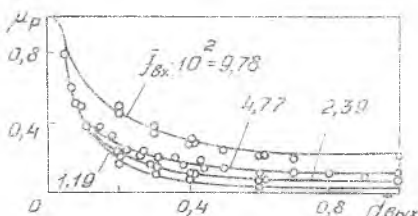
$$|\bar{u}| = \left[ -2 \int_{\eta=0}^{\eta} \frac{1}{\eta} \left( \frac{2\eta}{1+\eta^2} \right)^{2,7\omega} (n\omega \frac{1-\eta^2}{1+\eta^2} + 1) d\eta + C_3^2 \right]^{0,5}, \quad (8)$$

где  $C_3$  - постоянная интегрирования, имеющая смысл аксиальной скорости на оси циклонного потока. В соответствии с опытными данными

$$C_3 = |\bar{u}|_{\eta=0} = 0,14 (V_{z\text{м}})^{0,55}. \quad (9)$$



Р и с. 2. Радиальные распределения в осевом обратном течении вихревого потока: 1 -  $d_{\text{вих}} = 0,081$ , 2 - 0,309, 3 - 0,5, 4 - 0,7, линии - расчет по уравнению (8)



Р и с. 3. Расчетные (линии) и опытные (точки) значения коэффициента расхода вихревого устройства

На рис. 2 приведено сравнение экспериментальных и расчетных профилей  $\bar{u}$  в области осевого обратного течения. Численное решение (8) относительно  $\bar{z}_{00}$  для заданной геометрии вихревого устройства аппроксимируется зависимостью (6) при  $a = -0,02$ ;  $b = 0,57$ ;  $c = 3,75 \cdot 10^{-3}$ ;  $e = 4,2$ .

Безразмерный (отнесенный к выходному) массовый расход воздуха

$$\bar{G}_0 = 2 \frac{\rho_m}{\rho_{\text{вх}}} \bar{V}_{\text{см}}^2 (\bar{z}_{\text{см}}^{\text{вх}})^2 \int_0^{\bar{z}_{00}} |\bar{u}| \eta d\eta / \bar{f}_{\text{вх}}, \quad (\text{I0})$$

где  $\rho_m$  и  $\rho_{\text{вх}}$  - плотность на радиусе  $\bar{z}_{\text{см}}^{\text{вх}}$  и во входных каналах возрастает с увеличением  $\bar{d}_{\text{вх}}$ , достигая 60% при  $\bar{d}_{\text{вх}} = 1,0$ .

Объемный расход газа через вихревой аппарат можно связать с аэродинамическим сопротивлением  $\zeta_{\text{вх}}$  [4], используя коэффициент расхода

$$Q = \mu_p \frac{\pi}{4} (\bar{z}_{\text{вх}}^2 - \bar{z}_{00}^2) \sqrt{2 \Delta P_n / \rho_{\text{вх}}}, \quad (\text{II})$$

где  $\Delta P_n$  - перепад полного давления в устройстве.

Получив  $\mu_p$  из (II) и переходя к безразмерным величинам, получим

$$\mu_p = f_{\text{вх}} / [(\bar{z}_{\text{вх}}^2 - \bar{z}_{00}^2) \sqrt{\zeta_{\text{вх}}}], \quad (\text{I2})$$

На рис. 3 показано сопоставление расчетных и опытных значений  $\mu_p$  в широких диапазонах  $\bar{d}_{\text{вх}}$  и  $f_{\text{вх}}$ . Полученные данные могут быть использованы при расчетах и проектировании циклонных устройств различного технологического назначения.

#### Библиографический список

1. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. М.: Машиностроение, 1969. 183 с.
2. Кутателадзе С.С., Волчков Э.П., Терехов В.И. Аэродинамика и теплообмен в ограниченных вихревых потоках /ИТФ СО АН СССР. Новосибирск, 1987. 282 с.

3. Г у п т а А., Л и л л и Д., С а й р е д Н. Закрученные потоки. М.: Мир, 1987. 588 с.
4. С а б у р о в Э.Н., К а р п о в С.В., О с т а ш е в С.И., Теплообмен и аэродинамика закрученного потока в циклонных устройствах. Л.: Изд-во Ленинград. ун-та, 1989. 276 с.

УДК 536.344

Э.Н.Сабуров, Т.Г.Загоскина

РАСЧЕТ ТЕПЛОТДАЧИ НА БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ  
ВИХРЕВОГО УСТРОЙСТВА

(Архангельский лесотехнический институт)

Приводятся результаты расчета аэродинамики и теплоотдачи на боковой поверхности вихревого устройства. Поток в периферийной зоне рабочего объема представлен в виде своеобразной турбулентной струи. На основе численного решения дифференциальных уравнений получены расчетные формулы толщины пристенного пограничного слоя, скорости на его границе, теплоотдачи на боковой поверхности. Сопоставление решения динамической и тепловой задачи с экспериментальными данными показывает их хорошее совпадение.

Поток в периферийной зоне рабочего объема вихревой камеры представим в виде своеобразной турбулентной струи на криволинейной поверхности в спутном осесимметричном вращающемся потоке с неизменными радиусом  $\bar{r}_{гт}$  и скоростью на границе  $\bar{\omega}_{гт}$ .

Для анализа течения на основном участке струи координату  $X$  (начало координаты совместим со срезом входного сопла) направим вдоль поверхности камеры по криволинейной траектории движения

ISBN 5-230-16926-5

Вихревой эффект  
и его применение в технике.  
Самара, 1992