

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}_{gm} и скоростью на границе $\bar{\omega}_{gm}$.

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

струи, а координату y — нормально к ней; течение потока в струе разделим на две зоны: пристеночный слой толщиной δ и струйный, толщина которого равна δ_0 . Используем известную [1] систему уравнений плоского турбулентного пограничного слоя несжимаемого газа на криволинейной поверхности с постоянным радиусом продольной кривизны R .

Граничные условия задачи:

$$\begin{aligned} y=0, & \quad V_x = V_y = 0, \quad \tau = \tau_w; \\ y=\delta, & \quad V_x = V_\delta, \quad \tau = 0; \\ y=\delta_0 = (R - z_{zm}), & \quad V_x = V_0 = W_{z_{zm}}; \quad \tau = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где V_x, V_y — компоненты полной скорости потока; V_δ, V_0 — значения полной скорости на границе пристеночного и струйного пограничных слоев; τ — напряжение трения; τ_w — напряжение трения на поверхности.

Для замыкания исходной системы уравнений используем полученные нами эмпирические зависимости:

коэффициент сопротивления трения

$$C_f = 2\tau_w / \rho V_\delta^2 = 0,02128 (V_\delta \delta / \nu)^{-2/15}, \quad (2)$$

где ρ — плотность, ν — коэффициент кинематической вязкости;

распределение продольной компоненты скорости в пристеночной области

$$v/V_\delta = (y/\delta)^{1/4}, \quad (3)$$

в струйной части [2]

$$(v - V_0) / (V_\delta - V_0) = \left[1 - ((y - \delta) / (\delta - \delta_0))^{3/2} \right]^2. \quad (4)$$

В результате численного решения системы [1] при граничных условиях (1) с использованием формул (2)–(4) и последующего анализа результатов решения были получены расчетные формулы для толщины пристеночного пограничного слоя и скорости на его границе:

$$\bar{\delta} = \delta/h_{\delta x} = 0,0445(\bar{x})^{0,7} Re_0^{-0,064} \bar{R}^{0,312} m^{-0,078} B^{-0,064}, \quad (5)$$

$$\bar{V}_\delta = V_\delta/V_{\delta H} = B/\bar{x}^{0,18}, \quad (6)$$

где $\bar{x} = x/h_{\delta x}$; $Re_0 = V_{\delta H} h_{\delta x}/\nu$;

$h_{\delta x}$ - высота сопел (шлицев); $V_{\delta H}$ - скорость потока в начале основного участка; $\bar{R} = R/h_{\delta x}$; $m = W_{грм}$; $B = 2,515 \bar{f}_{\delta x}^{0,126}$;

$\bar{f}_{\delta x} = f_{\delta x}/\bar{x} R^2$ - безразмерная площадь входных сопел.

Сопоставление опытных и расчетных данных показывает их вполне удовлетворительную сходимость.

Рассмотрим общий случай теплообмена струи на боковой поверхности камеры с начальным необогреваемым участком. Физические характеристики среды и температуру на границе пристеночного пограничного слоя принимаем постоянными. При данных предположениях интегральное соотношение энергии может быть записано следующим образом:

$$\frac{d}{dx} \int_0^{\delta_T} v(T_k - T) dy = q_w / \rho c_p, \quad (7)$$

где T_k - температура поверхности теплообмена (камеры); δ_T - толщина теплового пограничного слоя; q_w - плотность теплового потока на поверхности теплообмена.

Распределение избыточной температуры ($\vartheta = T - T_k$) имеет вид

$$\vartheta/\vartheta_\delta = (y/\delta_T)^{1/4}, \quad (8)$$

где $\vartheta_\delta = T_\delta - T_k$ - избыточная температура среды на границе теплового пограничного слоя.

Касательное напряжение трения и плотность теплового потока в пределах турбулентного ядра пограничного слоя определяем формулами

$$\tau/\rho = \varepsilon_\sigma dv/dy, \quad (9)$$

$$q/\rho c_p = \varepsilon_q d\vartheta/dy, \quad (10)$$

где $\varepsilon_\sigma, \varepsilon_q$ - кинематические коэффициенты переноса количества движения и теплоты; ρ - плотность; c_p - теплоемкость.

Разделив уравнение (10) на (9) и приняв, что для тонкого граничного слоя $q = q_w$ и $\tau = \tau_w$ и перейдя к безразмерным переменным, получим уравнение

$$St = (c_{fk}/2) Pz_{\tau\sigma}^{-1} (\delta_\tau/\delta)^{-1/4}$$

где $St = q_w/\rho c_p V_\infty \delta$; $c_{fk} = 2\tau_w/\rho V_\infty^2$.

В результате преобразований уравнение (7) представим в виде

$$\frac{d}{d\bar{x}} (\delta_\tau/\delta)^{15/14} + (\delta_\tau/\delta)^{15/14} / Re_\delta \frac{dRe_\delta}{d\bar{x}} = \frac{8}{7} St \frac{1}{\delta}.$$

Для решения дифференциального уравнения (12) использованы полученные при решении динамической задачи уравнения (5), опытная зависимость для напряжения поверхностного трения (2) отношение (II). После подстановки и преобразований уравнение будет иметь вид

$$\frac{d\tilde{\delta}}{d\bar{x}} + 0,555 \frac{\tilde{\delta}}{\bar{x}} = 0,414 \bar{x}^{-0,77} Re_0^{-0,061} B^{-0,061} \bar{R}^{-0,354} m^{0,088} Pz_{\tau\sigma}^{-1}$$

где $\tilde{\delta} = (\delta_\tau/\delta)^{8/7}$.

Решение уравнения (13)

$$\delta_\tau/\delta = 0,4095 Re_0^{-0,053} \bar{x}^{0,201} \left[1 - (x_{нч}/\bar{x})^{0,785} \right]^{7/8} B^{-0,053} \bar{R}^{-0,31} m^{0,077}$$

где $x_{нч}$ - длина начального необогреваемого участка.

Подставив уравнение (14) в выражение (II) и представив член Стантона как

$$St = \frac{Nu_0}{Pz Re_0} \frac{\bar{x}^{0,18}}{B},$$

получим уравнение для расчета местного коэффициента теплоотдачи траектории движения струйного потока на основном участке

$$Nu_0 = 0,016 Re_0^{0,88} B^{0,88} \bar{x}^{-0,264} R^{0,02} m^{-0,016} P_2 P_{2,15}^{-0,04} [1 - (x_{Hy}/x)^{0,785}]^{-1/16}, \quad (16)$$

где $Nu_0 = d h_0 / \lambda$ - число Нуссельта; P_2 - число Прандтля;
 $P_{2,15} = \epsilon_\sigma / \epsilon_\eta$ - турбулентное число Прандтля.

Совпадение полученных расчетных и экспериментальных данных удовлетворительное.

Для практических расчетов можно рекомендовать формулу, несколько скорректированную на основе опытных данных:

$$Nu = 0,0174 Re^{0,85} \bar{h}_{\delta x}^{-0,17} \bar{x}^{-0,246} B^{0,88} [1 - (x_{Hy}/x)^{0,785}]^{-1/16}, \quad (17)$$

где $Nu = \alpha D_k / \lambda$; $Re = V_{\delta x} D_k / \nu$; D_k - диаметр камеры.

Зависимость (17) справедлива при $Re \cdot 10^{-4} = 12 \dots 69$. Отклонение опытных данных от расчетных по уравнению (17) не превышает $\pm 10\%$.

Интегрируя уравнение (17) от нуля до \bar{x} (x - полная длина криволинейной траектории струи в вихревой камере), получаем расчетную зависимость для среднего коэффициента теплоотдачи на полной длине траектории

$$Nu_{ср} = 0,0236 Re^{0,85} \bar{x}^{-0,264} B^{0,88} \bar{h}_{\delta x}^{-0,17}. \quad (18)$$

Результаты исследований могут быть использованы при тепловых расчетах вихревых устройств.

Библиографический список

1. Федяевский К.К., Гиневский А.С., Колесников А.В. Расчет турбулентного пограничного слоя несжимаемой жидкости. Л.: Судостроение, 1973. 256 с.

2. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. М.: Физматиздат, 1960. 715 с.