

ТРЕНИЕ И ТЕПЛОБМЕН В РЕАКТИВНЫХ СОПЛАХ И В ТРУБОПРОВОДАХ С ШЕРОХОВАТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Сергиенко А.А., Чжоу Вэйсин

Московский государственный авиационный институт (технический университет), г. Москва

Предлагается интегральная методика расчета трения и теплообмена на стенках трубопроводов в реактивных соплах и на криволинейных поверхностях со случайно распределенной шероховатостью. Методика основана на обобщении опытных данных по влиянию случайной шероховатости на теплообмен и трение в трубах, на плоских пластинках и в градиентных потоках на модельных соплах в широком диапазоне изменения

величины бугорков случайной шероховатости $\frac{\delta^{**}}{K_s} = 1 \div 10^4$

относительно толщины потери импульса пограничного слоя. Определено критическое значение числа Re_w^{**} по толщине потери импульса пограничного слоя, при котором режим течения на гладкой поверхности переходит в режим течения в ТПС на шероховатой.

Гидравлическое сопротивление, обтекаемых несжимаемой жидкостью шероховатых поверхностей со случайно распределенной шероховатостью, исследовались в работах Никурадзе, Прандтля-Шлихтинга, Кармана, Себиси, Пимента и др. [1,3,4,7]. Однако для течений сжимаемого газа с числом Маха большим 0.5 имеется мало данных по трению и теплообмену на поверхностях со случайной шероховатостью. Поэтому и были проведены настоящие исследования для определения коэффициента трения и числа Стантона для шероховатых поверхностей.

Различают три режима течения в турбулентном пограничном слое (ТПС). Первый режим - над гидравлически гладкой стенкой, где высота бугорков шероховатости значительно меньше толщины вязкого подслоя

$Re_{кр} = \frac{\rho_w U_\tau K_s}{\mu_w} < 3.5 \dots 10$. Второй, промежуточный, в диапазоне

$3.5 \dots 10 < Re_{кр} < 55 \dots 70$ и третий режим при $Re_{кр} > 55 \dots 70$ с полным проявлением шероховатостям (ППШ). Здесь ρ_w, μ_w - плотность и коэффициент динамической вязкости при давлении P_w и температуре T_w

обтекаемой поверхности; $U_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho_w}}$; $\tau_w = C_f \frac{\rho_u W_u^2}{2}$.

На промежуточном режиме коэффициент трения на 10...15% отличается от режима ППШ. Учитывая точности измерений и определения эффективной высоты бугорков шероховатости, в предлагаемой методике промежуточный режим не рассматривается и принимается, что коэффициент трения \tilde{N}_f на гидравлически гладкой поверхности сразу переходит к \tilde{N}_{fr} на режиме ППШ при некотором критическом значении $(Re_{k\tau})_{кр}$.

Из обобщения опытных данных для несжимаемой жидкости по трению на гидравлически гладких поверхностях [1,2,3] можно получить аппроксимирующую формулу

$$\tilde{N}_{fn} = B(Re_w^{**})^{-m}, \quad \text{где } \hat{A} = 0.0176 \text{ и } m = 0.2 \quad (1)$$

в диапазоне

$$Re_w^{**} = \frac{\rho_u W_u \delta^{**}}{\mu_w} = 10^3 \div 10^5,$$

где ρ_u, W_u плотность и скорость на внешней границе пограничного слоя.

Закон трения для ТПС сжимаемого газа, обтекающего гидравлически гладкую стенку с теплообменом, основывается на законе трения несжимаемой жидкости с поправочными множителями

$$\psi_1, \psi_2, \psi_3: \quad \tilde{N}_f = C_{fn} \cdot \psi_1 \cdot \psi_2 \cdot \psi_3.$$

$\psi_1(\gamma, M_u)$ - учитывает сжимаемой среды,

$$\psi_1 = \left(1 + \frac{\gamma + 1}{2} r M_u^2 \right)^{-0.625},$$

где $r = 0.8 \dots 0.9$ - коэффициент восстановления температуры на адиабатической стенке, $M_u = \frac{W_u}{a_w}$ - течения на внешней границе слоя.

$$\psi_2 = (0.75 \bar{T}_w^{0.5} + 0.25)^{-1}$$

учитывает влияние теплообмена по отношению температуры стенки T_w к

полной температуре газа T_0 .

$$\psi_3 = 1 + 0.25th(20\varepsilon)$$

учитывает влияние пульсаций скоростей турбулентности внешнего потока

$$\varepsilon = \frac{1}{3} \sqrt{(\overline{u'})^2 + (\overline{v'})^2 + (\overline{w'})^2}$$

Так что

$$\tilde{N}_f = \frac{B \cdot \psi_1 \cdot \psi_2 \cdot \psi_3}{(\text{Re}_w^{**})^m} = \frac{B \cdot [1 + 0.25th(20\varepsilon)]}{(\text{Re}_w^{**})^m \left(1 + \frac{\gamma+1}{2} r M_u^2\right)^{0.625} \cdot (0.75 \overline{T}_w^{0.5} + 0.25)} \quad (2)$$

Изменение режима течения в ТПС происходит при критическом значении числа $\text{Re}_{k\tau}$

$$\text{Re}_{k\tau} = \frac{\rho_w U_\tau K_s}{\mu_w} = \text{Re}_w^{**} \cdot \frac{K_s}{\delta^{**}} \sqrt{\frac{C_{fr} \cdot \tau(\lambda_u)}{2 \overline{T}_w}} = 3.5 \dots 10. \quad (3)$$

Он найдется из закона трения для гладкой поверхности в точке с Re_{3w}^{**} с условием $C_f = C_{fr}$

$$\text{Re}_{3w}^{**} = \left\{ \frac{2 \overline{T}_w \tau(M_u)}{B \psi_1 \psi_2 \psi_3} \left[(\text{Re}_{k\tau})_{kp} \cdot \frac{\delta^{**}}{K_s} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2-m}}; \quad (4)$$

$$\tau(M_u) = 1 + \frac{\gamma+1}{2} \cdot M_u^2.$$

Подставив это значение $\text{Re}_{3w}^{**} = \text{Re}_w^{**}$ в (1), получим: коэффициент трения для ТПС на шероховатой поверхности в режиме ППШ

$$\tilde{N}_{fr} = \left[\frac{(B \psi_1 \psi_2 \psi_3)^{\frac{1}{m}}}{\sqrt{2 \overline{T}_w \tau(M_u)}} \cdot \frac{K_s}{(\text{Re}_{k\tau})_{kp} \delta^{**}} \right]^{\frac{2m}{2-m}} \quad (5)$$

Как видно, при неизменном отношении $\frac{K_s}{\delta^{**}}$ вдоль обтекаемой шероховатой поверхности и при прочих одинаковых значениях параметров: $\psi_1, \psi_2, \psi_3, \overline{T}_w, M_u, B, m$ и $(\text{Re}_{k\tau})_{kp}$ - коэффициент трения остается

постоянным.

Расчет тепловых нагрузок при теплообмене на шероховатой поверхности производится с привлечением аналогии Рейнольдса между трением и теплообменом по формуле для числа Статона (St):

$$St_r = \frac{C_{fr}}{2} \cdot \left(1 + 0.411 C_{fr}^{0.5} \cdot Re_{kr}^{0.45} \cdot Pr^2\right)^{-1} \cdot Pr^{-0.67}, \quad (6)$$

где Pr - число Прандтля

Однако в законе сопротивления (5) для ТПС с ППШ и (4) имеется две не точно определенные величины. Это критическое значение числа Re_{kr} (3.5...10) и величина бугорков эквивалентной (песочной) шероховатости. Они были уточнены на основе сравнения расчетов и экспериментальных данных с измерением параметров пограничного слоя и толщины потери импульса δ^{**} в выходном сечении сопел.

С этой целью был разработан алгоритм и составлена программа расчета пограничного слоя, начиная с ламинарного и далее с переходным от ЛПС к ТПС [1,2,3,5] с ТПС на гладкой и шероховатой поверхности. Расчеты сравнивались с опытными данными на двух круглых соплах: длинном сопле аэродинамической трубы с плавно изменяющимся контуром с $d_{kp} \approx 36mm$ и коротким соплом с угловой точкой и резко изменяющим контуром [5]. Оба сопла имели одинаковый диаметр выходного сечения $d_a = 60mm$, и одинаковые число $M_a = 2.5$ на выходе. Чистота внутренней поверхности сопел измерялась профилометром и составляла $R_z = 0.01mm$ или $R_a = 0.0025mm$, что соответствует 6-ому классу чистоты поверхности по ГОСТ(2789-73).

Результаты сравнений представлены на рис 1. Они позволили уточнить значения $(Re_{kr})_{kp}$ и установить связь между эффективной высотой бугорков песочной шероховатости и параметрами шероховатости на реальных поверхностях наиболее близкое согласование расчетов и опытных данных имеет место при

$$(Re_{kr})_{kp} = 5 \dots 7.5 \quad K_s = R_a = 0.0025.$$

В результате расчетов получено изменение числа Re_w^{**} по контуру испытанных сопел (рис. 2, 3). Как видно, при больших числах Re_w^{**} имеет место участок сопла в районе критического сечения, который имеет режим течения в ТПС с ППШ. Однако ближе к выходу из сопла, где δ^{**}

увеличивается, а K_s — остается постоянным режим течения в ТПС возвращается к режиму гидравлически гладкой стенки. Здесь, как и в случае с ламинарно-турбулентным переходом, возможно как переход от режима гидравлически гладкого сечения к режиму с полным проявлением шероховатости так и наоборот. Но при больших числах Re_w^{**} режим ППШ будет распространяться на весь контур вплоть до выхода.

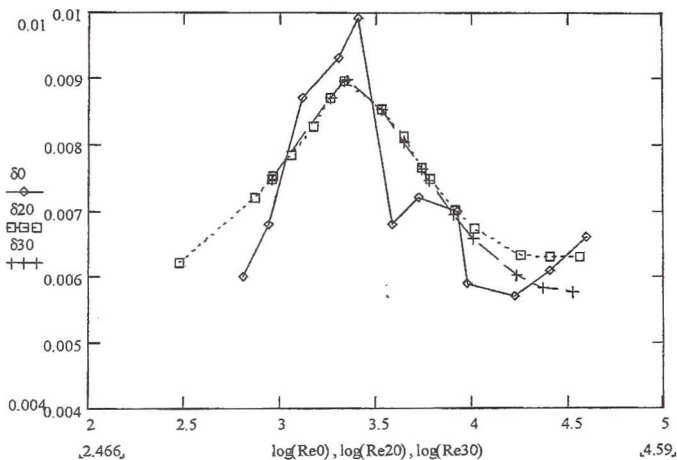


Рис.1. Толщина потери импульса в выходном сечении сопла с $M = 2,5$ в зависимости от числа Re_w^{**} (изменялось за счет P_0 - давления в ресивере)

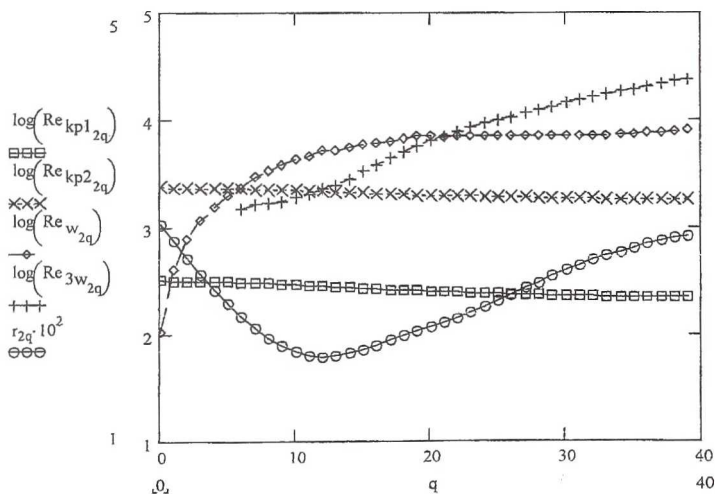


Рис.2. Режим с ППШ в районе минимального течения при умеренных Re_w^{**}

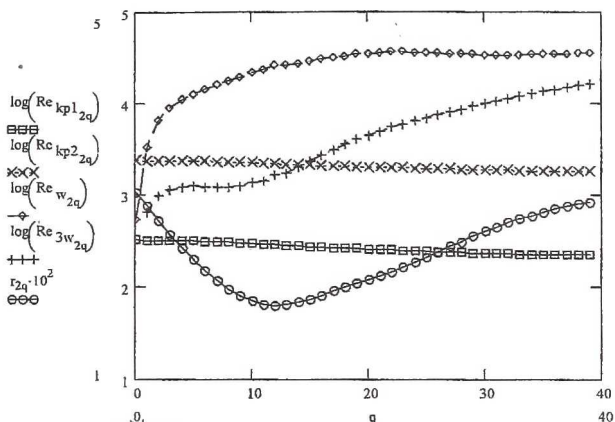


Рис.3. Режим с ППШ на всем контуре сопла вплоть до выхода при больших числах Re_w^{**}

Поэтому можно рекомендовать при умеренных Re_w^{**} увеличивать чистоту поверхности сопла в районе критического сечения до уровня обтекания гидравлически гладкой стенки. Это позволит уменьшить плотность тепловых потоков в наиболее теплонапряженном месте реактивного сопла и снизить потери удельного импульса. Рекомендации по гидравлически гладкой стенке (малая шероховатость) позволят снизить гидравлическое сопротивление и тепловые потоки.

На криволинейных поверхностях со случайно распределенной шероховатостью следует вести расчет пограничного слоя по линиям тока невязкого течения.

Список литературы

1. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике. Под общей редакцией академика Авдуевского В.С. и Кошкина В.К. – М.: Машиностроение, 1992.- 518 с.
2. Теория теплообмена. Под редакцией академика Леонтьева А.И. – М.: Издательство МГТУ 1997.-582 с.
3. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя.- М.: Наука, 1969. – 744 с.
4. Калинин Э.К. Дрейцер Г.А. и др. Эффективные поверхности теплообмена.- М.: Энергоатомиздат, 1998.-407 с.
5. Асадоллахи Гохих А., Сергиенко А.А. Интегральный метод расчета переходного пограничного слоя в реактивных соплах. Авиационная техника. -1999. - № 4. С. 47-50
6. Жукаускас А.А., Шланчяускас Б. Теплоотдача в турбулентном потоке жидкости. Вильнюс. «Минтис» 1973.- 327 с.
7. Себиси Т., Брэдшоу П. Конвективный теплообмен. Физические основы и вычислительные методы. – М.: Мир. 1987.- 578 с.