

## КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ В ПУСКОВОМ РЕЖИМЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Канд. техн. наук, доц. Ю.Г. ВОЛОДИН, асп. К.С. ФЕДОРОВ, асп. М.В. ЯКОВЛЕВ

*Выполнено экспериментальное исследование влияния нестационарности, вызванной резким увеличением температуры газового потока, на величину локальных значений коэффициента трения.*

*Accomplished experimental research under the influence of unsteady-state received at the rapid augment of the temperature in the gas flow on quantity of the local value coefficient friction.*

Функционирование энергетических и тепловых установок сопровождается воздействием на кинематическую и тепловую структуры потока эффектов нестационарности и неизотермичности. Появление таких возмущающих течение факторов связано с выполнением регламентных мероприятий, выбором оптимальных маневренных характеристик и т.д.

Один из важнейших параметров, отражающих гидродинамику течения и протекание теплообменных процессов, — это коэффициент трения  $C_f$ . Рассмотрим совместное влияние неизотермичности и нестационарности на начальном участке цилиндрического канала при резком увеличении температуры газового потока. Экспериментальные исследования были проведены на аэродинамическом стенде разомкнутого типа с электродуговым подогревом рабочего тела. Опытный канал представляет собой цилиндрическую трубу, выполненную из стали X18H9T (диаметр  $D = 45$  мм), составленную из отдельных секций длиной  $D$  и толщиной стенок 0,08 мм. В эксперименте индуктивными датчиками давления ДМИ и хромель-копелевыми и хромель-алюмелевыми термопарами диаметром 40 мкм измерялись: полное давление  $P_0^*$ , температура на входе в опытный канал  $T_0$ , распределение по длине канала температуры стенок  $T_w$ , статического давления и пристенных касательных напряжений трения  $\tau_w$  [1,2]. Информация от первичных преобразователей температуры и давления через 8-канальный модуль аналогового ввода ADAM 4019 и RS — 232/485 поступала в ЭВМ. Метрологические исследования [3–5] характеристик измерительных систем показали, что исследуемые системы не имеют искажений амплитуды и фазы во всем диапазоне измерений. Диапазоны составили: числа Рейнольдса  $Re$ , построенного по среднерасходной скорости, 30000...60000, температуры рабочего тела от 293 до 1500 К с градиентом температуры до 12000 К/с. Среднеквадратичные погрешности измерения температуры и коэффициента трения в опытах не превысили 2,5 % и 9,6% соответственно.

Гидродинамическая нестационарность в опытах при постоянстве массового расхода обуславливается увеличением температуры газового потока  $T_0$  на входе в опытный канал при пуске плазмотрона, при этом наблюдается монотонный рост температур стенок  $T_w$  во всех измерительных сечениях канала. Темп прогрева стенок по длине опытного канала различен и снижается с продвижением по направлению течения по мере увеличения толщины пограничного слоя.

Для анализа [6] влияния нестационарности и продольного градиента давления на характеристики трения запишем уравнение движения

$$\rho \frac{\partial w_x}{\partial t} + \rho w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + \rho w_r \frac{\partial w_x}{\partial r} = -\frac{dp}{dx} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\tau)}{\partial r}, \quad (5)$$

которое для пристенной области имеет вид

$$-\frac{dp}{dx} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\tau)}{\partial r} = 0. \quad (6)$$

Учитывая, что для потенциальной области потока уравнение записывается в виде

$$-\frac{dp}{dx} = \rho_o \frac{\partial w_o}{\partial t} + \rho_o w_o \frac{\partial w_o}{\partial x}, \quad (7)$$

получаем

$$\bar{\tau}_w = \left( \frac{\partial \bar{\tau}}{\partial \xi} \right)_w = -\frac{2\delta}{C_f} \frac{1}{w_o^2} \frac{\partial w_o}{\partial t} - \frac{2\delta}{C_f} \frac{1}{w_o} \frac{\partial w_o}{\partial x} - \frac{\delta}{r_o} = z + \lambda - \frac{\delta}{r_o}, \quad (8)$$

где  $z$  — параметр нестационарности,  $\lambda$  — параметр продольного градиента давления,  $\delta$  — толщина пограничного слоя,  $r_o$  — радиус канала;  $\rho$  — плотность;  $w_o$  — скорость потока;  $t$  — время;  $x$  — продольная координата;  $y$  — поперечная координата;  $\xi = y/\delta$  — относительная поперечная координата; индексы:  $o$  — параметры на оси потока,  $w$  — параметры на стенке.

Степень влияния нестационарности и неизотермичности определяется изменением начальных условий. Резкое увеличение температуры (рис. 1) газового потока, сопровождаемое соответствующим уменьшением плотности и повышением вязкости исследуемой среды, приводит к увеличению скорости потока. Изменение скорости в потенциальной

части потока  $\frac{\partial w_o}{\partial t}$  достигает 700 м/с<sup>2</sup>, а комплекс  $-\frac{1}{w_o^2} \frac{\partial w_o}{\partial t}$  (8), характеризующий

параметр нестационарности  $z$  (8), достигает максимальных значений при  $t = 0,04$  с. Тем-

пературный фактор  $\Phi_h = \frac{T_w}{T_o}$ , уменьшается от 1 до 0,25.

Известно [7], что ускорение потока, вызванное нестационарностью и неизотермичностью (т.е. при уменьшении  $z$  и  $\Phi_h$ ), приводит к большей заполненности профиля скоростей и сопровождается ростом пристенных касательных напряжений трения  $\tau_w$ . В наших опытах наибольших значений  $\tau_w$  достигает в момент времени  $t = 0,04$  с, при котором параметр нестационарности  $z$  максимален. Во все моменты времени величины пристенных касательных напряжений трения по длине канала уменьшаются вниз по течению. Коэффициент трения (рис. 2) во всех измерительных сечениях также увеличивается до момента времени 0,04 с, а затем плавно уменьшается. Экспериментальные точки располагаются выше линии, представляющей стандартный закон трения, определяемый выражением [7]

$$\frac{C_{f_o}}{2} = \frac{0,0128}{\text{Re}^{*0,25}}. \quad (9)$$

Для выявления количественного влияния гидродинамической нестационарности на коэффициент трения в интервале  $0 < t < 0,15$  с опытные точки, независимо от располо-

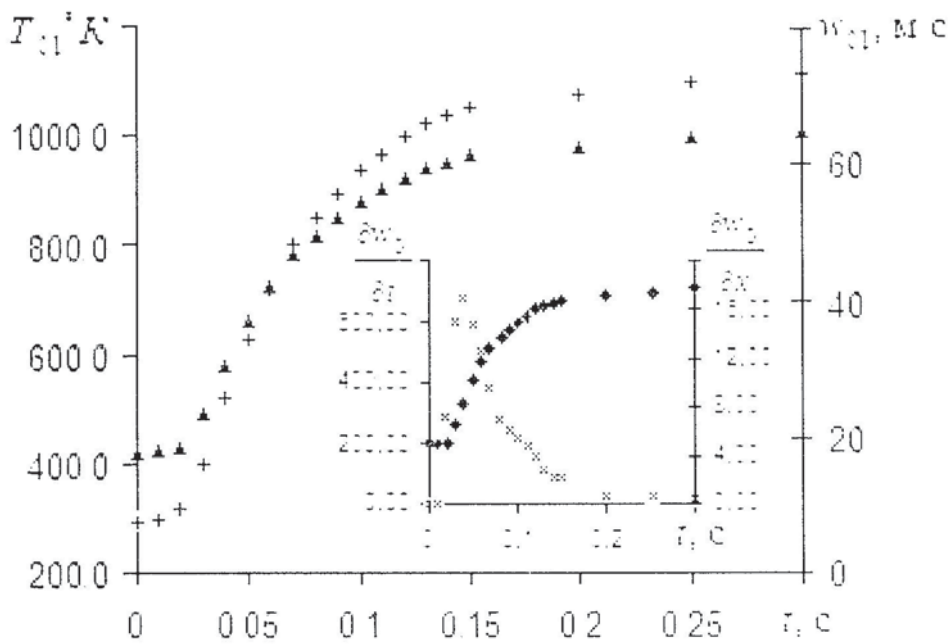


Рис. 1. Эволюция во времени начальных условий:  $T_{01}$ ,  $\blacktriangle$   $w_{01}$ ,  $\blacklozenge$   $\partial w_0 / \partial x$ ,  $\times$   $\partial w_0 / \partial t$ ,  $+$

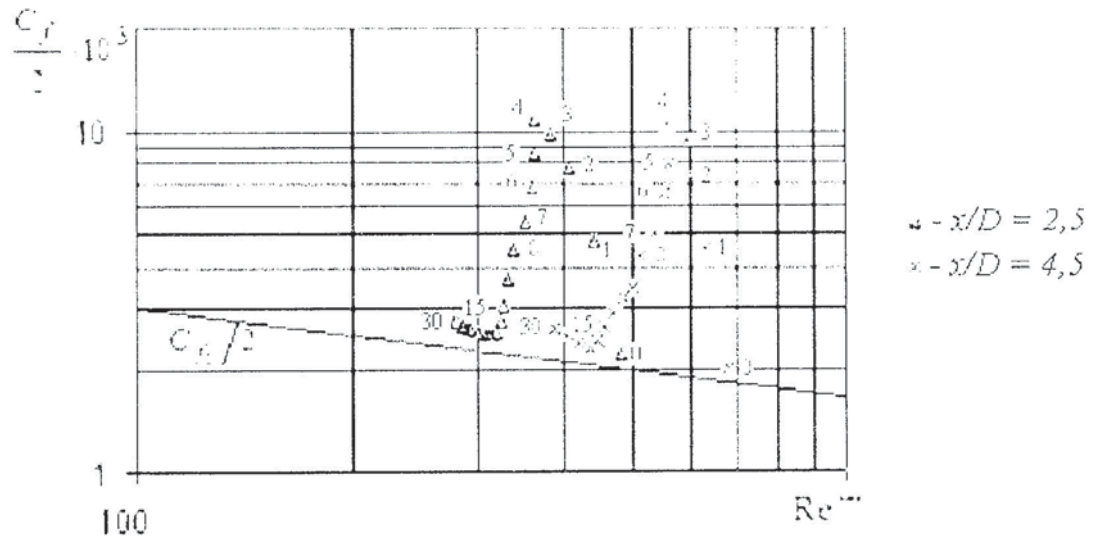


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения от числа  $Re^{**}$ :  $x$  — продольная координата. Цифры около точек означают время 100t с.

жения измерительного сечения по длине канала, аппроксимированы степенным полиномом вида

$$\Psi_z = \frac{C_f}{C_{f0}} = 1 - 0,0375z^2 - 0,635z. \tag{10}$$

К моменту времени  $t = 0,15$  с нестационарный процесс можно считать законченным, так как в интервале  $t > 0,15$  с, который характеризуется постоянством температуры  $T_0$  газового потока, опытные значения  $C_f$  располагаются около стандартной зависимости и несколько выше. Учет факторов неизотермичности и продольного градиента давления позволяет отклонившиеся точки в интервале времени  $t > 0,15$  с сгруппировать около стандартной зависимости в пределах точности эксперимента.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Р е п и к Е. У., К у з е н к о в В. К. Исследование нового метода опытного определения поверхностного трения в турбулентном пограничном слое // Инж. — физ. журн. — 1980. — Т. 38, № 2. — С. 197—200.
2. Ф а ф у р и н А. В., П у с т о в о й т Ю. А., Ф о м и н А. В., Г о л у б е в Ю. Л. Измерение пристеночных касательных напряжений в цилиндрическом канале методом «трубка-выступ» // Тепло- и массообмен в химической технологии. — Казань, 1981. — С. 3—5.
3. Н и к и ф о р о в А. Н., Ф а ф у р и н А. В. и др. Исследование динамических характеристик пневмометрических приемников // Тр. метр. Ин-тов СССР. — М., Казань: Изд-во стандартов, 1977. — Вып. 182 (242). — С. 84—88.
4. Г и л ь ф а н о в К. Х. Экспериментальное определение динамических характеристик микротермопар, измеряющих температуру газового потока // Тепло- и массообмен в двигателях летательных аппаратов. — Казань: КАИ, 1982. — С. 51—54.
5. Г и л ь ф а н о в К. Х., И г н а т ь е в Ю. П., В о л о д и н Ю. Г. Автоматизированный стенд для динамической градуировки микротермопреобразователей // Развитие системы метрологического обеспечения измерений расхода и количества веществ. — Казань, 1984. — С. 115—116.
6. Ф а ф у р и н А. В. Законы трения и теплоотдачи в турбулентном пограничном слое // Тепло- и массообмен в двигателях летательных аппаратов. — Казань: КАИ, 1979. — Вып. 2. — С. 62—69.
7. К у т а т е л а д з е С. С., Л е о н т ь е в А. И. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. — М.: Энергия, 1972. — 342 с.