

УДК 532.526:532.542

Л.М. Хотин, А.И. Ершов (канд.техн.наук),
И.М. Плехов (канд.техн.наук)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ТРЕНИЯ В ЗАКРУЧЕННОМ ПОТОКЕ

Определение локального трения необходимо для создания надежных методов расчета течения на начальных участках труб и контактных элементов, применяемых в тепло- и массообменной аппаратуре. Известно несколько способов определения поверхностного трения [1, 2], основанных на его непосредст-

венном измерении (плавающий элемент, измерение крутящего момента), на свойствах пограничного слоя (датчики Стантона и Престона), на применении электрохимического метода и др. В настоящей работе сделана попытка применить датчик Престона для исследования потока с закруткой на входном участке.

Авторы работы [2] отмечают, что отклонение трубки полного напора, лежащей на стенке, от направления вектора скорости на угол $\pm 5^\circ$ практически не влияет на ее показания. Для ориентации трубки Пито в закрученном потоке предварительно определялся угол движения потока вблизи стенки с помощью двухканального датчика со скошенными кромками [6]. Однако данный метод дает хорошие результаты только в том случае, когда трубка Пито целиком расположена в той области пограничного слоя, где существует логарифмический профиль скорости, т.е. когда условия течения определяются величинами τ_0 , ρ , ν и характерной длиной. При этом величина локального касательного напряжения связана с разностью полного и статического давлений, измеренных на стенке, следующей функциональной зависимостью [1]:

$$\frac{(P - p_{ст0})d^2}{\rho \nu^2} = F \left(\frac{\tau_0 d^2}{\rho \nu^2} \right), \quad (1)$$

где P - показания трубки полного напора, Н/м^2 ; $p_{ст0}$ - статическое давление на стенке, Н/м^2 ; τ_0 - напряжение поверхностного трения на стенке, Н/м^2 ; d - диаметр трубки полного напора, м; ρ и ν - плотность и коэффициент кинематической вязкости среды, кг/м^3 , $\text{м}^2/\text{с}$.

При тарировке датчиков в прямолинейном потоке в аэродинамической трубе Престоном было получено следующее выражение для этой зависимости:

$$\lg \tau^+ = -1,396 + 0,875 \lg P^+, \quad (2)$$

а авторами работы [2]:

$$\lg \tau^+ = -1,306 + 0,863 \lg P^+, \quad (3)$$

где $\tau^+ = \frac{\tau_0 d^2}{4\rho\nu^2}$ и $P^+ = \frac{(P - p_{ст0})d^2}{4\rho\nu^2}$.

Отношение диаметров $\frac{d_{\text{вн}}}{d}$ трубки Пито не входит в уравнение (1), так как оно не влияет на P^+ [3].

Экспериментальные исследования проводились в трубе диаметром $D = 32$ мм длиной $L = 20D$, выполненной из оргстекла. На входном участке устанавливались статические лопастные завихрители с углом наклона лопаток $20, 30$ и 40° , средняя скорость воздуха изменялась в диапазоне $15-30$ м/с. Измерения трения, профилей скоростей и давлений проводились в пяти сечениях по длине трубы. С учетом вышеизложенного диаметр трубки Пито, плотно прижатой к стенке, был выбран равным $0,65$ мм, диаметр отверстий для измерения статического давления равнялся $0,8$ мм. Величина $P - P_{\text{ст}}$ определялась по дифманометру МКВ-250-0,02 с точностью до $0,01$ мм вод.ст., затем по уравнениям (2) и (3) рассчитывались локальные значения τ_0 . Далее по методу наименьших квадратов определялась зависимость $\tau_0 = f[L]$, после интегрирования которой была получена средняя величина касательного напряжения τ на всей длине трубы.

Величину τ можно также получить из баланса сил в осевом направлении и баланса моментов, приложенных к контрольному объему между двумя сечениями по следующим уравнениям:

$$2\pi\rho \int_0^R u_I^2 r dr + 2\pi \int_0^R p_{\text{ст}I} r dr = 2\pi\rho \int_0^R u_{II}^2 r dr + 2\pi \int_0^R p_{\text{ст}II} r dr + \tau_x 2\pi r L, \quad (4)$$

где w и u - тангенциальная и осевая скорости, м/с;

$$2\pi\rho \int_0^R u_I w_I r^2 dr = 2\pi\rho \int_0^R u_{II} w_{II} r^2 dr + \tau_\varphi \cdot 2\pi R^2 L, \quad (5)$$

где τ_x и τ_φ - осевая и тангенциальная составляющие среднего касательного напряжения на стенке трубы, Н/м^2 .

Профили скоростей и статического давления были взяты в первом сечении ($L = 0$) и в последнем ($L = 20D$). Полученные значения τ с точностью до $5 \div 8\%$ совпали с величиной среднего трения, рассчитанного по уравнению (3). На рис. 1 показана зависимость коэффициента сопротивления

$c_f = \frac{\tau_0}{0,5 \rho V^2}$ от критерия крутки m , где V — полная скорость на расстоянии $\frac{r}{R} = 0,9$. Там же штриховыми линиями нанесены опытные данные из работы [4]. За критерий крутки принято отношение углового импульса потока к аксиальному импульсу потока, умноженному на радиус трубы:

$$m = \frac{2\pi \rho \int_0^R u w r^2 dr}{2\pi \rho \int_0^R u^2 r dr \cdot R} \quad (6)$$

Как видно из рис. 1, соответствие полученных значений локального трения литературным данным удовлетворительное. При этом следует учесть, что закрутка потока [4] осуществлялась с помощью тангенциально расположенных направляющих лопаток.

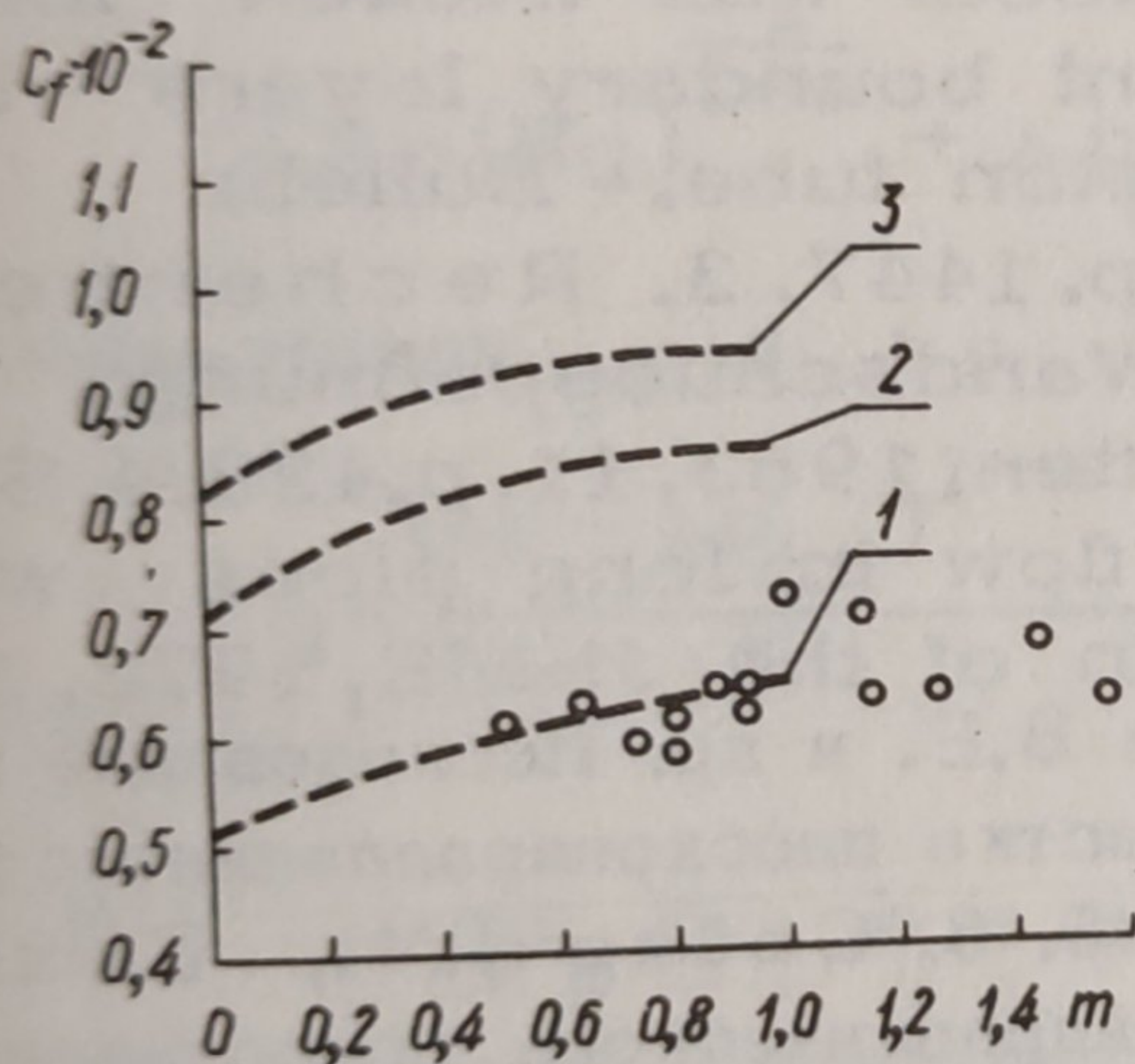


Рис. 1. Изменение коэффициента сопротивления C_f от критерия крутки m : \circ — полученные экспериментальные данные; --- — результаты работы [6] при различной шероховатости трубы: 1 — $\frac{K}{D} = 1,0 \cdot 10^{-5}$; 2 — $1,3 \cdot 10^{-3}$; 3 — $2,5 \cdot 10^{-3}$

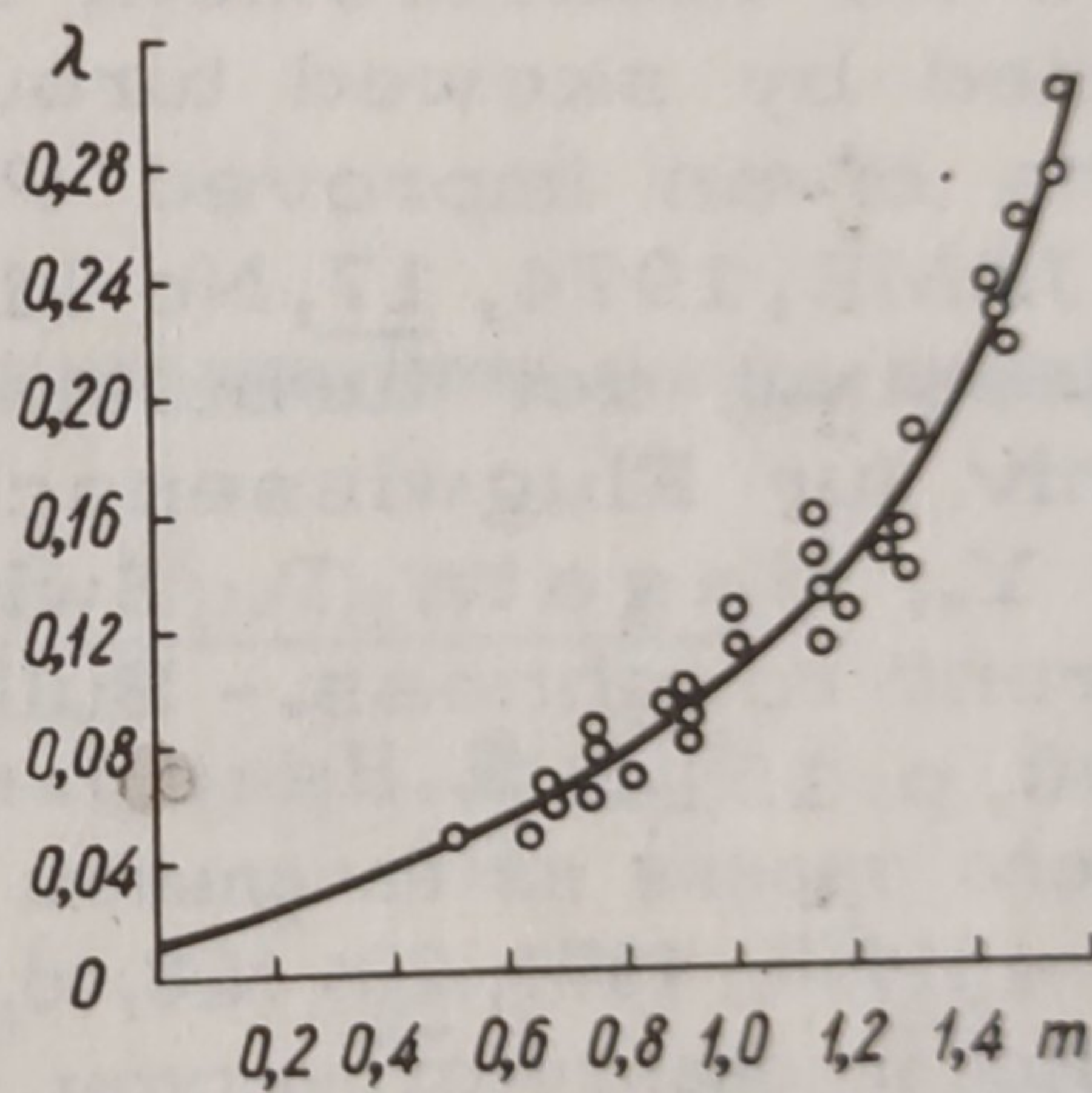


Рис. 2. Изменение коэффициента сопротивления λ в зависимости от критерия крутки m : \circ — полученные экспериментальные данные; — — кривая по уравнению (7).

В инженерной практике более удобно рассчитывать коэффициент трения по средней расходной скорости газа. На рис. 2 нанесены значения коэффициента сопротивления $\lambda =$

$$= \frac{8\tau_0}{\rho U_{cp}^2} \quad \text{в зависимости от параметра } m \text{ . Эти опытные}$$

данные с точностью до 2% аппроксимируются следующим выражением:

$$\lambda = \lambda_{ос} (1 + 11m - 10m^2 + 8,8m^3). \quad (7)$$

Из рис. 2 видно, что при сильной закрутке потока λ может более чем на порядок превышать коэффициент сопротивления турбулентного осевого потока $\lambda_{ос}$.

В ы в о д

Методика определения локального трения, предложенная Престоном для полностью развитой области прямолинейного течения, может быть использована в закрученном потоке.

Л и т е р а т у р а.

1. Preston J.H. The determination of turbulent skin friction by means of pitot tubes. - J. Roy. Aeron. Soc., 1954, 58, p. 109.
2. Nishi M., Senoo Y., Terazono M. Measurement of local wall friction force exerted by skewed turbulent boundary layers by means of an improved Preston tube. - Bulletin of the JSME, 1974, 17, No 118, p. 1447.
3. Rechenberg J. Messung der turbulent Wandschubspannung. - Archiv für Flugwissenschaften, 1963, 11, p. 429.
4. Senoo Y., Nagata T. Swirl flow in long pipes with different roughness. - Bulletin of the JSME, 1972, 15, No. 90, p. 1514.
5. Накоряков В.Е. и др. Исследование локального трения на начальном участке плоскопараллельного канала. - ИФЖ, 1971, 20, №6, с. 1015.
6. Собин В.М., Ершов А.И. Исследование структуры и гидравлического сопротивления турбулентного закрученного потока в коротких трубах. - "Изв. АН БССР. Сер. физ.-энергетич. наук", 1972, №3, с. 56.