

Л. М. ХОТИН, А. И. ЕРШОВ, И. М. ПЛЕХОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕНИЯ В ОДНО- И ДВУХФАЗНОМ ЗАКРУЧЕННОМ ПОТОКЕ

Одним из способов интенсификации процессов тепло- и массопереноса является использование в контактных устройствах закрученного движения газа (пара) и жидкости. Вместе с тем создание надежных методов расчета явлений переноса в закрученном потоке частично сдерживается из-за отсутствия сведений о поверхностном трении.

Известно несколько способов определения поверхностного трения [1—3], основанных на его непосредственном измерении (плавающий элемент, измерение крутящего момента), на свойствах пограничного слоя (датчики Стантона и Престона), на применении электрохимического метода и др.

Экспериментальное определение касательного напряжения трения во вращающемся потоке является сложной и малоизученной задачей. Способы установки на внутренней поверхности трубы плавающего элемента или измерение крутящего момента здесь почти не применимы. В связи с этим в работе [6] была сделана попытка определить величину касательного напряжения на внутренней поверхности кольцевого канала с помощью датчиков Престона.

При тарировке датчиков в аэродинамической трубе Престон получил следующую зависимость:

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

где $\tau^+ = \tau_0 d^2 / 4\rho v^2$; $P^+ = (P - P_0) d^2 / 4\rho v^2$; τ_0 — напряжение трения на поверхности, Н/м²; v , ρ — кинематический коэффициент вязкости и плотность среды, м²/с и кг/м³ соответственно; d — диаметр трубки Пито, плотно прижатой к стенке, м; P — величина полного давления, измеренного трубкой Пито, Н/м²; P_0 — статическое давление на стенке, Н/м².

Позднее авторами работы [2] зависимость (1) была уточнена:

$$\lg \tau^+ = -1,306 + 0,863 P^+. \quad (2)$$

Отношение внутреннего диаметра трубки Пито к наружному $d_{\text{вн}}/d$, согласно работе [5], на значение P^+ не влияет.

В настоящей работе для исследования закономерностей трения в потоке с закруткой на входном участке также принята методика с использованием датчиков Престона. Для этого нами изготовлена экспериментальная установка, рабочим элементом которой является труба диаметром $D = 32$ мм, длиной $L = 20 D$, выполненная из оргстекла. На входном участке трубы устанавливались статические закручивающие устройства, выполненные в виде лопастного закручивателя с углом наклона лопаток к горизонту 20, 30 и 40°; закручивателя с тангенциальными шелями при

отношении площади щелей к площади трубы $F_{щ}/F_{тр}=0,436; 0,8722; 1,164$; шнекового двухзаходного закручивателя при отношении шага подъема винтовой линии к диаметру $t/d=0,875$ и $1,75$.

Средняя скорость воздуха в трубе изменялась в диапазоне 15—30 м/с. Измерения трения, профилей скоростей и давлений проводились в пяти сечениях по длине трубы на расстоянии 2, 4, 8, 13 и 20 диаметров от входного участка.

Область течения около стенки, в которой справедливо соотношение (1), занимает около 0,1—0,15 толщины пограничного слоя, поэтому диаметр трубки Пито, плотно прижатой к стенке, выбран равным 0,65 мм. Трубка была изготовлена из медицинской иглы, края тщательно отшлифованы и очищены от заусениц. Диаметр отверстия в стенке опытной трубы для измерения статического давления равен 0,8 мм. Разность давлений $P-P_0$ определялась по дифманометру МКВ-250-0,02 с точностью до 0,01 мм вод. ст. Изготовленный датчик был протарирован в прямоугольном аэродинамическом канале. Полученные экспериментальные данные с точностью до 2—3% согласуются с уравнением (2). В работе [2] установлено, что отклонение трубки Пито от направления вектора скорости на угол $\pm 5^\circ$ практически не влияет на ее показания, но нами предварительно определялся угол движения потока стенки по [4].

На первоначальной стадии исследования закрученных потоков величина крутки характеризовалась геометрическими параметрами закручивателей, такими, как отношение шага подъема винтовой линии к диаметру t/d , угол наклона лопаток α , угловая скорость вращения крыльчатки и др. Такие параметры не позволяют сравнивать результаты, полученные для различных типов закручивателей, так как они описывают какую-то начальную закрутку потока, не давая никаких сведений о ее затухании по длине элемента.

Некоторые исследователи за величину крутки принимают отношение тангенциальной скорости к осевой. Однако эта величина является характеристикой потока в данной точке и изменяется по радиусу и длине трубы.

Авторы работы [7] за критерий крутки предложили отношение углового импульса потока к аксиальному импульсу потока, умноженному на радиус трубы

$$m = \frac{2\pi\rho \int_0^R UWr^2 dr}{2\pi\rho \int_0^R U^2 r dr \cdot R}, \quad (3)$$

где U и W — осевая и тангенциальная составляющие полной скорости. Эта величина является характеристикой закрутки потока в некотором сечении по длине трубы.

Значения локального трения τ_0 , измеренные нами в пяти сечениях по длине и рассчитанные по уравнению (2), показаны на рис. 1 зависимостью от критерия крутки m , величина которого определялась по измеренным профилям скоростей в тех же сечениях. Для измерения осевой и тангенциальной составляющих вектора полной скорости использовалась методика [8] отдельного измерения угла направления потока, полного и статического давлений.

Значения τ_0 можно получить также из баланса сил в осевом направлении и баланса моментов, приложенных к контрольному объему между двумя сечениями по следующим уравнениям:

$$2\pi\rho \int_0^R U_1^2 r dr + 2\pi\rho \int_0^R P_{стI} r dr = 2\pi\rho \int_0^R U_{II}^2 r dr + \\ + 2\pi\rho \int_0^R P_{стII} r dr + \tau_{0x} 2\pi R (L_{II} - L_I). \quad (4)$$

$$2\pi\rho \int_0^R U_1 W_1 r^2 dr = 2\pi\rho \int_0^R U_{II} W_{II} r^2 dr + \tau_{0y} 2\pi R^2 (L_{II} - L_I), \quad (5)$$

$$\tau_0 = \sqrt{\tau_{0x}^2 + \tau_{0y}^2}, \quad (6)$$

где τ_{0x} и τ_{0y} — осевая и тангенциальная составляющие среднего касательного напряжения на стенке трубы, Н/м²; $P_{ст}$ — статическое давление, Н/м²; $L_{II} - L_I$ — расстояние между двумя сечениями, м.

Индексы I и II относятся соответственно к первому и второму сечениям. Полученные по (4) — (6) значения τ_0 являются средним значением касательного напряжения трения на участке между двумя сечениями. Прделав подобные вычисления для всех рассматриваемых сечений, получили зависимость $\tau_0 = f(L)$. Значения τ_0 откладывались на серединах соответствующих отрезков, по полученным точкам с помощью метода минимизации функционала строился полином 3-й степени и затем определялось значение локального трения в исследуемых сечениях по длине трубы. Оно получалось несколько большим, чем по методу Престона.

Экспериментальные данные, полученные двумя методами, для различных закручивающих устройств и среднерасходных скоростей, аппроксимированы полиномом (на рис. 1 показан сплошной линией). Среднеквадратичное отклонение не превышает 2—3%.

Следующим этапом настоящей работы было исследование касательных напряжений на границе раздела в двухфазном закрученном потоке. Так же, как и в случае однофазного потока, определялись профили скоростей и давлений в газовом ядре. В области, расположенной около межфазной поверхности раздела, вместе с газом движутся капли жидкости, унесенные с поверхности пленки. Поэтому пневмометрические трубки между измерениями продувались воздухом из компрессора. По аналогии с однофазным потоком касательные напряжения на поверхности раздела фаз находились из баланса сил и моментов, приложенных к цилиндрическому элементу трубы, охваченному межфазной поверхностью раздела. В этом отличие от соответствующих уравнений для однофазного потока, где элемент ограничен стенкой трубы.

$$2\pi \int_0^{R_i} (\rho U^2 + G_L U_L)_I r dr + 2\pi\rho \int_0^{R_i} P_{стI} r dr = 2\pi \int_0^{R_i} (\rho U^2 + G_L U_L)_{II} r dr + \\ + 2\pi\rho \int_0^{R_i} P_{стII} r dr + \tau_{ix} 2\pi R_i (L_{II} - L_I), \quad (7)$$

$$2\pi \int_0^{R_i} (\rho U W + G_L W_L)_I r^2 dr = 2\pi \int_0^{R_i} (\rho U W + G_L W_L)_{II} r^2 dr + \\ + \tau_{iy} 2\pi R_i^2 (L_{II} - L_I), \quad (8)$$

$$\tau_i = \sqrt{\tau_{ix}^2 + \tau_{iy}^2}, \quad (9)$$

где G_L , U_L и W_L — местные массовая, осевая и тангенциальная скорости капле жидкости, уносимых с поверхности пленки. Индекс i относится к межфазной поверхности раздела. Гравитационный член в уравнении (7) опущен.

Поскольку определение скорости капле является сложной задачей, а надежные опытные данные пока отсутствуют, определяемое по (7) — (9) τ_i включает в себя и величину потерь энергии на ускорение капле между двумя сечениями. Потери эти, по данным предыдущих исследова-

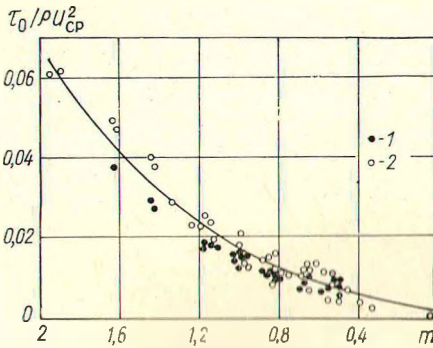


Рис. 1. Изменение коэффициента трения $\tau_0/\rho U_{cp}^2$ от критерия крутки m : 1—(2); 2—(4)—(6); сплошная линия — аппроксимирующий полином

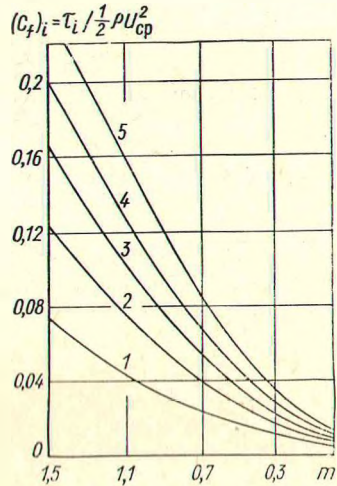


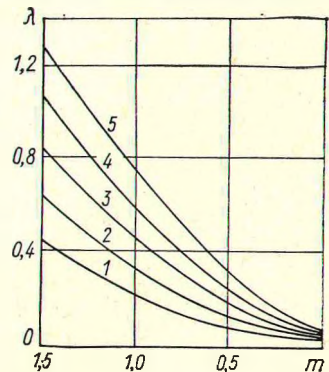
Рис. 2. Изменение коэффициента трения $(C_f)_i$ от критерия крутки m : 1— $q=0$; 2—0,35; 3—0,55; 4—0,75; 5— $q=1$

ний, не превышают 6—10%, а в некоторых случаях закрученного потока унос капле почти отсутствует.

Значения касательных напряжений τ_i получены по (7)—(9) для различных конструкций завихрителей. Плотность орошения q изменялась в диапазоне 0,3—1,05 м³/(м·ч), среднерасходная скорость 15—25 м/с. Жидкость в элемент подавалась через кольцевую щель в стенке. Опытные значения τ_i были аппроксимированы полиномом для каждого значения q и полученные кривые нанесены на рис. 2 в зависимости от критерия крутки m . При $m \rightarrow 0$ мы практически имеем дело с осевым двухфазным потоком, поэтому полученные значения безразмерного коэффициента трения сравнивались с литературными. Для данных расходных параметров по известным формулам [9] для осевого потока получены значения толщины пленки

$$\delta = 1,68 v_{ж} (Re_{ж} / U_{cp}^{0,75}) \quad (10)$$

Рис. 3. Изменение коэффициента сопротивления λ_i от критерия крутки m : 1—5 см. на рис. 2



и далее по [10]

$$(C_f)_i = \tau_i / \frac{1}{2} \rho U_{\text{ср}}^2 = 0,005 \left(1 + 300 \frac{\delta}{D} \right). \quad (11)$$

Величина коэффициента сопротивления $(C_f)_i$, рассчитанного по уравнению (11), совпадает с полученными экспериментальными значениями при малых q . При увеличении плотности орошения разность значений опытных и литературных данных достигает 30%. С учетом сказанного выше такое расхождение литературных и опытных результатов можно считать удовлетворительным.

Потери энергии в закрученном потоке определялись по уравнению

$$2\pi\rho \int_0^{R_i} P_{\text{пл}} r dr = 2\pi\rho \int_0^{R_i} P_{\text{пл}} r dr + \frac{\lambda_i}{D} \frac{\rho U_{\text{ср}}^2}{2} (L_{\text{II}} - L_1), \quad (12)$$

где $P_{\text{пл}}$ — локальное значение полного давления.

Полученные экспериментальные значения коэффициента трения λ_i , аппроксимированные полиномами, нанесены на рис. 3 в зависимости от критерия крутки m . При $m=0$ соблюдается строгое равенство $\lambda_i = 8\tau_i / \rho U_{\text{ср}}^2$.

Summary

The experimental values are discussed of shear stresses on a tube wall in a one-phase flow and on an interphase surface in an ascending two-phase flow swirled over a starting region. Different designs of swirling units are compared in terms of a swirling criterion.

Литература

1. Preston J. H. J. Roy. Aeron. Soc., 58, 109, 1954.
2. Nishi M., Senoo Y., Terazono M. Bull. of the JSME, 17, 118, 1447, 1974.
3. Накоряков В. Е. и др. ИФЖ, 20, 6, 1015, 1971.
4. Собин В. М., Ершов А. И. Весті АН БССР, серія фіз.-енерг. навук, № 3, 1972.
5. Rechenberg I. Archiv für Flugwissenschaften, 11, 429, 1963.
6. Устименко Б. П., Змейков В. Н. Сб. «Проблемы теплоэнергетики и прикладной теплофизики», вып. I. Алма-Ата, 1964, стр. 145.
7. Yajnik K. S., Subbaian M. Y. J. Fluid Mech., 60, 4, 665, 1973.
8. King M. K., Rothfus R. R., Kermode R. I. AIChE J., 15, 6, 837, 1969.
9. Тананайко Б. Н., Воронцов Е. Г. Методы расчета и исследования пленочных процессов. Киев, 1975.
10. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения. М., 1972.

Белорусский технологический институт
им. С. М. Кирова

Поступила в редакцию
4.08.1977