

**ПОВЕРХНОСТНОЕ ТРЕНИЕ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ С ПОЛОЖИТЕЛЬНЫМ ГРАДИЕНТОМ ДАВЛЕНИЯ**

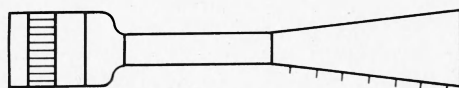
*О. Н. Кашинский, С. С. Кутателадзе, В. А. Мужин,  
В. Е. Накоряков*

(Новосибирск)

На основе измерения касательного напряжения на стенке при течении жидкости в диффузоре электродиффузионным методом предложена зависимость относительного коэффициента трения от форм-параметра аэродинамической кривизны. Проведено исследование интенсивности пульсаций касательного напряжения на стенке и момента возникновения обратных течений. Приведено сравнение результатов измерения коэффициента трения электродиффузионным методом и методом Клаузера.

Для турбулентного пограничного слоя на плоской пластине имеется большое количество надежных экспериментальных данных о поверхностном трении, полученных методом плавающего элемента [1]. Такие измерения недостаточно надежны при течениях с градиентом давления.

Не надежны также другие методы. Соответствующие данные ограничены. В [2] проведено измерение поверхностного трения при течении с градиентом давления методом теплового элемента. Имеется ряд работ, в которых определение касательного напряжения на стенке производилось путем использования так называемого универсального пристенного распределе-



Фиг. 1

ния скорости, численные коэффициенты которого взяты по результатам измерений на плоской пластине и коррелируются только на основании опытов. [2] Соответствующий обзор содержится в [3].

Ниже приводятся данные, полученные при непосредственном измерении трения на стенках диффузора электродиффузионным методом [4, 5].

Рабочий участок был выполнен в виде плоского диффузора с входным сечением  $40 \times 100 \text{ мм}^2$ , углом расширения  $8^\circ$  и длиной  $440 \text{ мм}$ . Перед рабочим участком стояла форкамера с трубчатым успокоителем, конфузор с коэффициентом поджатия, равным трем, и предвключенный участок, представляющий собой плоский канал сечением  $40 \times 100 \text{ мм}^2$  и длиной  $440 \text{ мм}$ , служивший для создания на входе в диффузор начальной толщины пограничного слоя. Схема рабочего участка приведена на фиг. 1. Вдоль центральной линии одной из расходящихся стенок диффузора было помещено семь электродиффузионных датчиков. Расстояние между соседними датчиками  $55 \text{ мм}$ , первый датчик был помещен на расстоянии  $440 \text{ мм}$  от входа. Чувствительным элементом датчика был торец платиновой проволоки диаметром  $0.5 \text{ мм}$  или пластинки сечением  $0.02 \times 0.2 \text{ мм}^2$ . Рабочей жидкостью был раствор  $0.005 \text{ N}$  ферри- и ферроцианида калия и  $0.5 \text{ N}$  едкого натра в дистиллированной воде. Для обеспечения постоянства физических свойств температура жидкости поддерживалась постоянной в пределах  $25 \pm 0.2^\circ \text{ C}$ .

Значение касательного напряжения на стенке  $\tau_0$  оценивалось по формуле [5]

$$(1) \quad \tau_0 = \frac{1.87\mu}{F^3 l^2 h^3 D^2 c_0^3} I^3 = A I^3$$

где  $\mu$  — динамическая вязкость;  $F$  — число Фарадея;  $l, h$  — продольный и поперечный размеры датчика;  $D$  — коэффициент диффузии;  $c_0$  — концентрация ионов феррицианида;  $I$  — ток датчика.

Расчетная величина коэффициента  $A$  определялась из измерений при полностью развитом турбулентном течении в плоском канале. Эталонное значение касательного напряжения рассчитывалось по формуле Блазиуса. Отличие тарировки от точной оценки по формуле (1) не превышало 7%.

Поскольку для турбулентного потока в диффузоре характерно наличие сильных пульсаций скорости и касательного напряжения на стенке, средняя величина последнего вычислялась по формуле

$$(2) \quad \bar{\tau}_0 = A \bar{I}^3 \cong (\bar{I}^3 + 3I'\bar{I}^2)$$

Среднее значение тока  $I$  определялось осреднением показания тока датчика диаметром 0.5 мм, для которого характерна высокая стабильность показаний во времени. Измерения среднего квадрата пульсаций тока  $I'$  производились датчиком с размером по потоку 0.02 мм, что практически исключало влияние частоты сигнала на характеристику прибора [4]. Мгновенное значение сигнала этого датчика возводилось в квадрат и затем осреднялось.

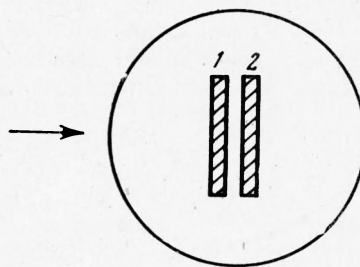
Оценка относительной интенсивности турбулентных пульсаций касательного напряжения на стенке  $\tau_0'$  производилась по формуле, аналогичной применяемой в термоанемометрии [6]

$$(3) \quad \sqrt{\tau_0'^2 / \bar{\tau}_0} = 3\sqrt{I'^2 / \bar{I}}$$

Измерение скорости потока производилось трубкой Пито с размером входного сечения  $0.3 \times 0.6$  мм<sup>2</sup>. Трубка перемещалась перпендикулярно стенке. Измерения проводились при скоростях набегающего потока 1.1, 1.53 и 2.24 м/сек. Степень турбулентности потока на выходе конфузора 2.2 ÷ 2.5%. Измерения этой величины были проведены с помощью электродиффузионного датчика скорости [5].

Для фиксации момента возникновения обратных течений использовался датчик специальной конструкции, состоящий из двух близко расположенных катодов (фиг. 2). При направлении потока, указанном на фигуре, датчик 2 показывал меньшее значение тока, чем датчик 1, вследствие экранирующего действия диффузионного слоя первого датчика. В случае появления обратного течения меньшее значение тока соответствовало датчику 1. Сравнение величин токов датчиков производилось специальной электронной схемой, которая позволяла также определить время существования обратного течения. Для повышения быстродействия с целью фиксации коротких выбросов обратного течения в момент их зарождения суммарный размер сдвоенного датчика был сделан минимально возможным (50 мкм).

На фиг. 3, а приведены распределения скорости на внешней границе пограничного слоя  $U$  и числа Рейнольдса  $Re^{**}$ , построенного по толщине потери импульса  $\delta^{**}$ , по длине рабочего участка при скорости во вход-



Фиг. 2

ном сечении 1.53 м/сек. На фиг. 3, б представлены эти же величины в опытах [2].

Результаты измерений касательного напряжения представлены на фиг. 4 в виде зависимости относительного коэффициента трения

$$\psi = (C_f / C_{f_0})_{Re^{**}} = \text{const}$$

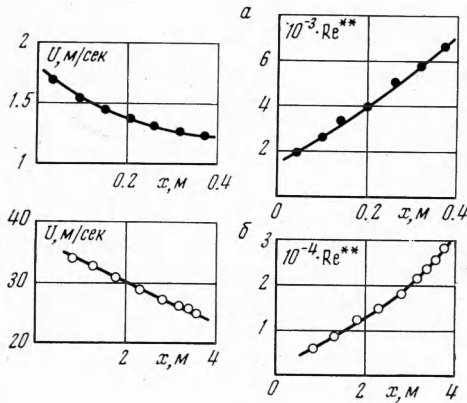
где  $C_{f_0}$  — коэффициент трения на плоской пластине, в зависимости от форм-параметра аэродинамической кривизны

$$f = (\delta^{**} / U) (dU / dx).$$

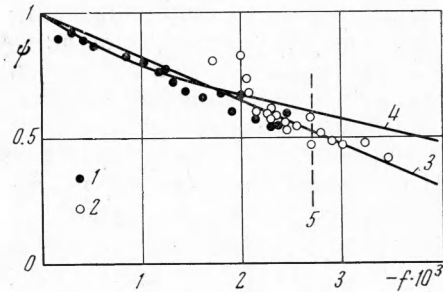
Результаты экспериментов авторов, так же как и результаты опытов [2], хорошо аппроксимируются линейной зависимостью

$$(4) \quad \psi = 1 + 1.77 \cdot 10^2 f$$

Принятые на фиг. 4 обозначения таковы: 1 — данные [2], 2 — данные авторов, 3 — зависимость по формуле (4), 4 — расчет по [7], пунктирная линия 5 соответствует моменту возникновения обратных течений.



Фиг. 3



Фиг. 4

Результаты расчета по [7] достаточно хорошо описывают опытные данные до значений форм-параметра  $-f$ , равных  $2.6 \cdot 10^{-3}$ .

С помощью описанного сдвоенного датчика было зафиксировано возникновение выбросов обратного течения малой длительности при значении  $-f \approx 2.7 \cdot 10^{-3}$ . Время существования обратного течения не превышало 2%; таким образом, наличие выбросов обратного течения не могло существенно повлиять на правильность измерений касательного напряжения на стенке.

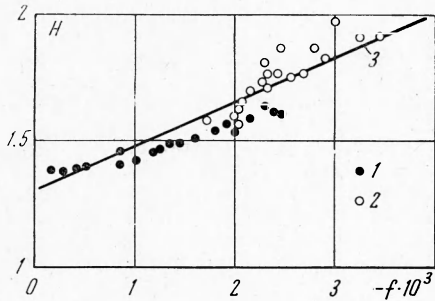
На фиг. 5 приведена связь между форм-параметрами  $H$  и  $f$ , где  $H$  — отношение толщины вытеснения к толщине потери импульса, по данным [2] и авторов. В первом приближении связь между этими величинами можно аппроксимировать линейной зависимостью

$$(5) \quad H = 1.3 - 1.77 \cdot 10^2 f$$

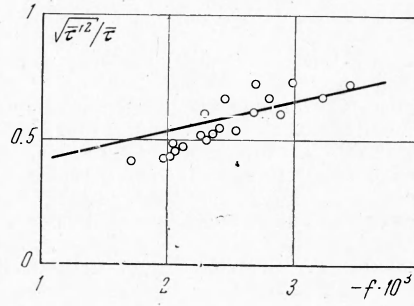
На фиг. 5 точки 1 — данные [2], 2 — данные авторов, 3 — зависимость, рассчитанная по формуле (5).

На фиг. 6 приведены результаты измерения относительной интенсивности турбулентных пульсаций касательного напряжения на стенке  $\sqrt{\overline{v'^2}} / \bar{v}$ , построенные в зависимости от форм-параметра  $f$ . С ростом абсо-

лутной величины  $f$  происходит увеличение интенсивности пульсаций касательного напряжения до 0.7, в то время как в безградиентном течении эта величина, как показано в [8], близка к 0.3. Наличие пульсаций большой интенсивности сопровождается образованием «языков» обратного течения, которые появляются при  $f = -2.7 \cdot 10^{-3}$ . При наличии больших пульсаций необходимо учитывать второй член в выражении (2), который в данных опытах составлял до 15% среднего значения. Результаты [2]



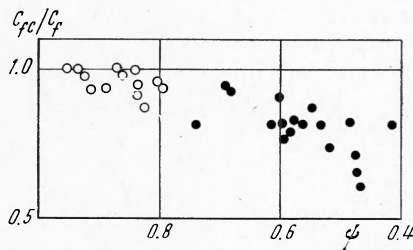
Фиг. 5



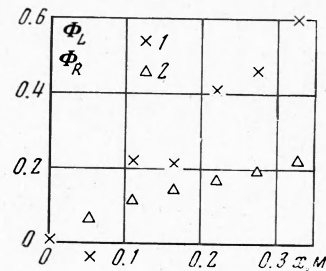
Фиг. 6

на фиг. 4 лежат в среднем ниже зависимости (4), что можно объяснить пренебрежением вторым членом в (2) при измерении трения методом теплового элемента.

Большинство результатов по измерению поверхностного трения получено с использованием метода Клаузера на основании универсального



Фиг. 7



Фиг. 8

профиля скорости [9]. Сопоставление результатов по измерению коэффициента трения электродиффузионным методом  $C_f$  и методом Клаузера  $C_{fc}$ , приведенное на фиг. 7, свидетельствует о желательном использовании прямых методов измерения трения при градиентных течениях.

В [2], а также в других экспериментах (см. [3]) наблюдается невыполнение уравнения импульсов в случае градиентных течений. Это явление наблюдалось в описанных экспериментах.

На фиг. 8 приведены проинтегрированные по  $x$  левая и правая части уравнения импульсов  $\Phi_L$  (точки 1) и  $\Phi_R$  (точки 2), определяемые следующим образом:

$$(6) \quad \Phi_L = \frac{U^2 \delta^{**}}{(U^2 \delta^{**})_0} - 1 + \frac{1}{2} \int_{x_c}^x \frac{\delta^{**}}{\delta_0^{**}} d \left( \frac{U^2}{U_0^2} \right)$$

$$\Phi_R = \int_{x_0}^x \left( \frac{v^*}{U_0} \right)^2 d \left( \frac{x}{\delta_0^{**}} \right)$$

где  $\delta^*$  — толщина вытеснения,  $v_* = \sqrt{\tau_0/\rho}$  — динамическая скорость,  $\rho$  — плотность жидкости, индексом 0 отмечены величины в точке, соответствующей первому датчику  $x = x_0$ , при скорости набегающего потока 1.53 м/сек.

Поступила 11 VI 1974

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Schulz-Cgrunow F.* Neues Reibungswiderstandsgesetz für glatte Platten. Luftfahrt forschung, 1940, Bd 17, H. 8.
2. *Ludwig H., Tillmann W.* Untersuchungen über die Wandschubspannung in turbulenten Reibungsschichten. Ingr-Arch., 1949, Bd 17, H. 4.
3. Computation of turbulent boundary layers. AFOSR — IFP — Stanford Conference. 1968. Proceedings, vol. 1, 2. Stanford, Calif., Stanford Univ., 1969.
4. *Кутателадзе С. С., Бурдуков А. П., Накоряков В. Е., Кузьмин В. А.* Применение электрохимического метода измерения трения в гидродинамике двухфазных сред. В сб. «Тепло- и массоперенос», т. 2. Минск, «Наука и техника», 1968.
5. *Mizushima T.* Electrochemical method in transport phenomena. Advances in heat transfer, vol. 7. N. Y., Acad. Press., 1971.
6. *Хинце И. О.* Турбулентность. М., Физматгиз, 1963.
7. *Кутателадзе С. С., Леонтьев А. И.* Теплообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М., «Энергия», 1972.
8. *Klebanoff P. S.* Characteristics of turbulence in a boundary layer with zero pressure gradient, NASA, 1955, Rept № 1247.
9. *Ротта И. К.* Турбулентный пограничный слой в несжимаемой жидкости. Л., «Судостроение», 1967.