

ТЕПЛОФИЗИКА

ВЛИЯНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТРЕНИЯ ТОРЦОВЫХ ПЛАСТИН НА ЗАТУХАНИЕ ПЛОСКОЙ СТРУИ

С.И. Исатаев, Г. Толеуов, М.С. Исатаев, М.К. Асембаева

НИИЭТФ, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы

В работе экспериментально исследовано влияние сопротивления трения торцовых пластин на закономерности развития плоской свободной струи. Установлено, что может существовать на торцовых поверхностях ламинарный, турбулентный и переходный слой в зависимости от конкретных условий. Получены эмпирические выражения для изменения максимальной скорости струи.

Для расчета влияния сопротивления трения торцовых стенок на интенсивность затухания плоской свободной турбулентной струи, необходимо сначала экспериментально определить закономерности изменения сопротивления на стенке. До сих пор были исследованы закономерности изменения сопротивления трения на поверхности пластин при обтекании турбулентной пристенной струи [2] и при продольном обтекании цилиндрической и конической поверхностей турбулентными струями, истекающими из сопел с кольцевым выходным сечением [3,4]. При значениях $\lambda > 10$ и относительно малой толщине пограничного слоя на поверхности торцовой стенки $\delta_n \ll h$ можно предположить о подобии пристенного пограничного слоя с пограничным слоем на пластине при обтекании однородным потоком. Измерения напряжения трения и коэффициента сопротивления на торцовой поверхности вдоль и поперек направления струи для некоторых значений λ приведены на рис.1-5.

Как известно, свободная струя становится турбулентной начиная с $Re > 50$ и в основном участке струи вдоль оси уровень турбулентности $\varepsilon_{U_m} = \frac{\sqrt{U} r^2}{U_m}$ доходит до значений $20 \div 30\%$.

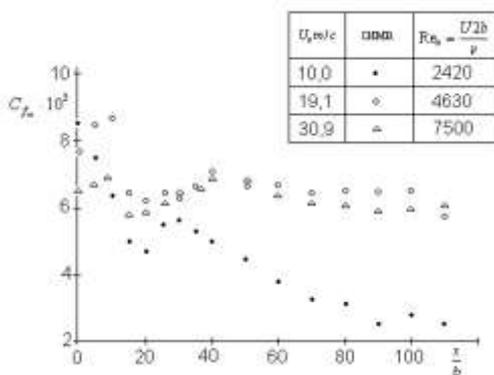


Рис. 1.а. Изменение коэффициента сопротивления на торцовой стенке при гладком сочленении пластины с кромкой сопла для $\lambda = 25$

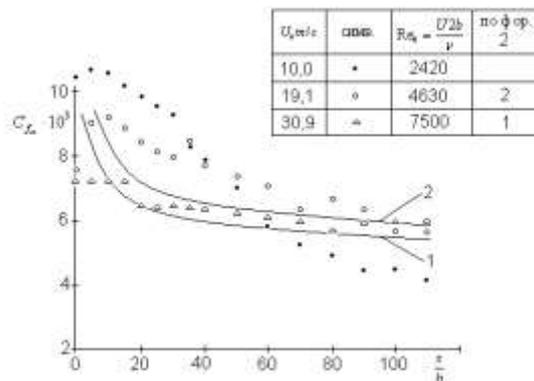


Рис. 1.б. Изменение коэффициента сопротивления на торцовой стенке при наличии турбулизатора у кромки сопла для $\lambda = 25$

При продольном обтекании плоской поверхности однородным потоком ламинарный пограничный слой может существовать до чисел $Re_x = \frac{U_0 x}{\nu} \leq 5 \cdot 10^5$. Однако, благодаря высокому уровню турбулентности струи можно было ожидать, что пограничный слой на торцовых стенках должен быть турбулентным практически по всей поверхности торцовых пластинок.

Опыты показали, что на самом деле может существовать на торцовых поверхностях ламинарный, турбулентный и переходный слой в зависимости от конкретных условий. Например, на торцовой поверхности струи при $\lambda = 16$ и начальной скорости $U_0 = 30,3$ м/с (рис.2) по всей длине струи до 100 калибров изменение коэффициента сопротивления трения совпадает с теоретической зависимостью для обтекания пластины однородным потоком с ламинарным пограничным слоем:

$$C_f = \frac{0,664}{\sqrt{Re_{mx}}}, \quad (1)$$

где $Re_{mx} = \frac{U_m x}{\nu}$.

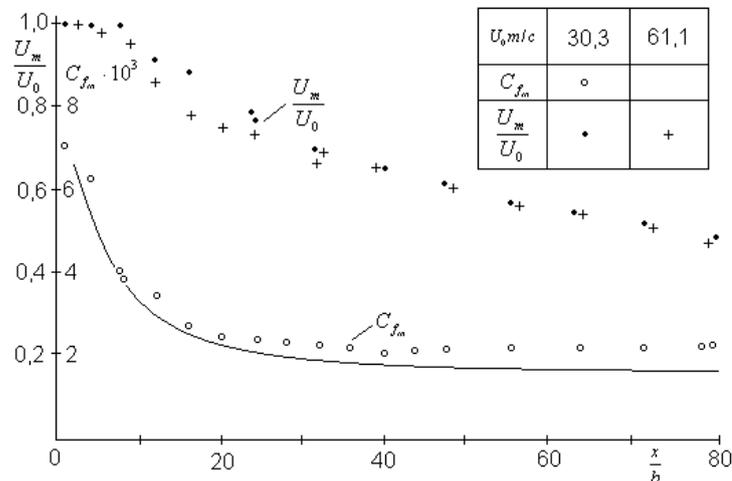


Рис. 2. Изменение осевой скорости и коэффициента сопротивления при $\lambda = 16$ и $Re_0 = \frac{U_0 b}{\nu} = 4518$

Линия на рис.2 соответствует расчету по формуле (1). На рис.1.а и 1.б приведены результаты изменений коэффициента сопротивления трения вдоль торцовой пластины по оси течения для $\lambda = 25$ при разных значениях начальной скорости. На рис.1.а видно, что при гладком сочленении торцовой пластины со стенками сопла вначале развивается ламинарный пограничный слой, который переходит в турбулентный в конце начального участка. Однако, при начальной скорости струи $U_0 = 10$ м/с коэффициент трения на стенке с удалением от сопла постепенно уменьшается, приближаясь к его значению при ламинарном пограничном слое.

При наличии турбулизирующего выступа, высотой $\sim 0,4$ мм на границе выходного сечения сопла и торцовой стенки с самого начала образуется турбулентный пограничный слой как при обтекании однородным потоком. На рис.1.б линии 1 и 2 построены по зависимости

$$C_f = \frac{0,0576}{\left(\frac{U_m x}{\nu}\right)^{0,2}} \quad (2)$$

для начальной скорости струи 30,9 и 19,0 м/с. Результаты опыта с зависимостью (2) удовлетворительно совпадают при $U_0 = 19,1$ и $30,9$ м/с. Однако значения опытных данных при $U_0 = 10$ м/с также не соответствует этой зависимости. На рис.3 приведены результаты измерений коэффициента сопротивления трения на торцевой стенке при $\lambda = 4, U_0 = 30$ м/с. Здесь видно, что в начальном участке течения образуется ламинарный пограничный слой, который на большом протяжении постепенно переходит в развитый турбулентный пограничный слой. На этом рисунке также приведены линии 1 и 2, рассчитанные по формулам (1) и (2).

Таким образом, видно, что на торцевых стенках могут развиваться как ламинарный, так и турбулентный пограничные слои с сопротивлениями, описываемыми по зависимости (1) и (2). Интересно отметить, что на интенсивность сопротивления трения на торцевых стенках высокий уровень турбулентности струйного течения не оказывает заметного влияния.

На рис.4 приведены профили скорости по оси y при $z = 0$ в координатах $\frac{U}{U_m} = f\left(\frac{y}{\delta}\right)$ и

коэффициента сопротивления трения $C_f = \frac{\tau_w}{\rho U^2}$ на торцевой стенке на разных расстояниях от сопла для $\lambda = 4, U_0 = 30$ м/с. Видно, что профили скорости обладают аффинным подобием, но распределение коэффициента сопротивления не обладает такой закономерностью. Однако, профили распределения напряжения трения в различных сечениях основного участка при $\frac{x}{b} > 30$ в координатах $\frac{\tau_w}{\tau_{wm}} = f\left(\frac{y}{\delta}\right)$, где δ - условная ширина

струи при $U = \frac{U_m}{2}$, обладает аффинным подобием (рис.5). Причем как видно, безразмерный профиль напряжения трения совпадает с безразмерным профилем скорости.

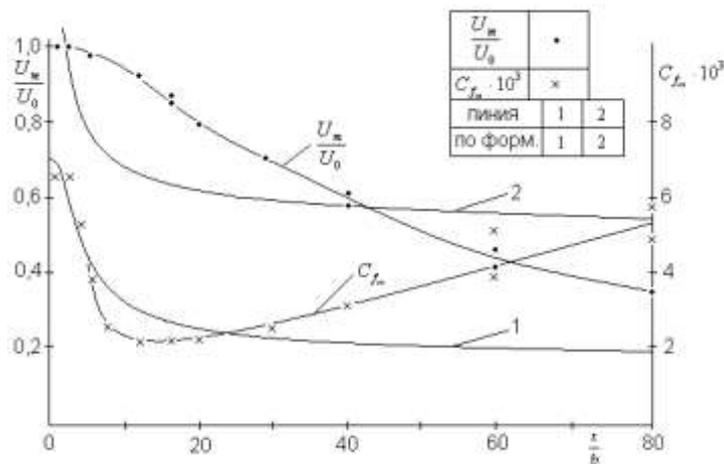


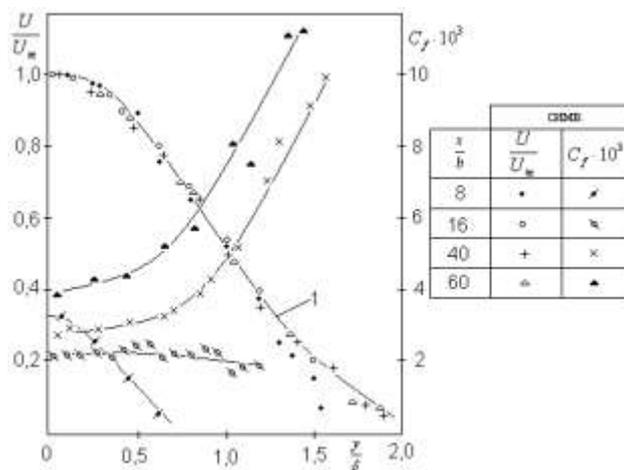
Рис. 3. Изменение коэффициента сопротивления трения на торцевой стенке при $\lambda = 4, U_0 = 30$ м/с

На рис.4 и 5 линии 1 соответствуют профилю скорости, впервые предложенный Г. Шлихтингом [1] в виде полинома

$$\frac{U}{U_m} = 1 - 6\eta^2 + 8\eta^3 - 3\eta^4, \quad (3)$$

здесь $\eta = \frac{y}{\delta_c}$, δ_c - полная полуширина струи, равная расстоянию от оси до внешней границы при $U=0$ и связанная с условной шириной $\delta_c = 2,59\delta$.

В связи с вышеизложенным необходимо рассчитать влияние сопротивления трения торцовых пластин на затухание струи как при ламинарном, так и при турбулентном пограничном слоях.



$$\lambda = 4, U_0 = 30 \text{ м/с.}$$

Рис. 4. Распределение скорости в плоскости симметрии ($z=0$) и коэффициент трения на торцовых стенках

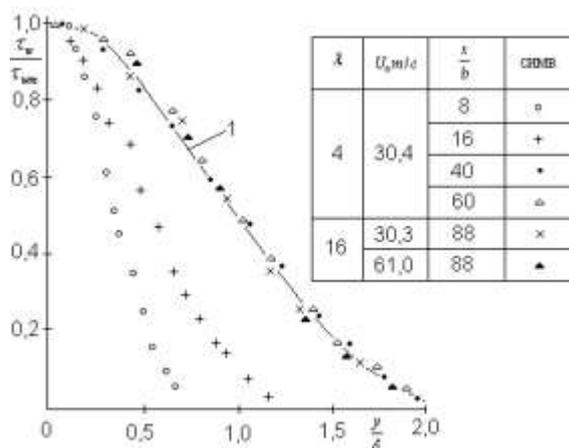


Рис. 5. Распределение напряжения трения на торцовых стенках

По этим данным был проведен расчет влияния сопротивления турбулентного пограничного слоя торцовых поверхностей на изменение максимальной скорости и в результате получена следующая формула:

$$\frac{U_m}{U_0} = \frac{N}{\sqrt{\frac{x}{b} + \frac{x_0}{b}}} \exp \left\{ -\frac{0,1481}{A} \left(\frac{x}{b}\right)^{0,9} + \frac{0,01372}{A^2} \left(\frac{x}{b}\right)^{1,8} - \frac{0,00288}{A^3} \left(\frac{x}{b}\right)^{0,27} \right\}, \quad (4)$$

где $A = \lambda \text{Re}_0^{0,2} N^{0,2}$, $\lambda = \frac{h}{b}$, $\text{Re}_0 = \frac{U_0 b}{\nu}$. Расчеты по этой формуле показывают, что поправка на уменьшение скорости составляет до 35 % для $\lambda < 10$.

Сравнение результатов расчета по формуле (4) приведено на рис.6 при $\lambda = 3$ и $U_0 = 4,3$ и 63,8 м/с.

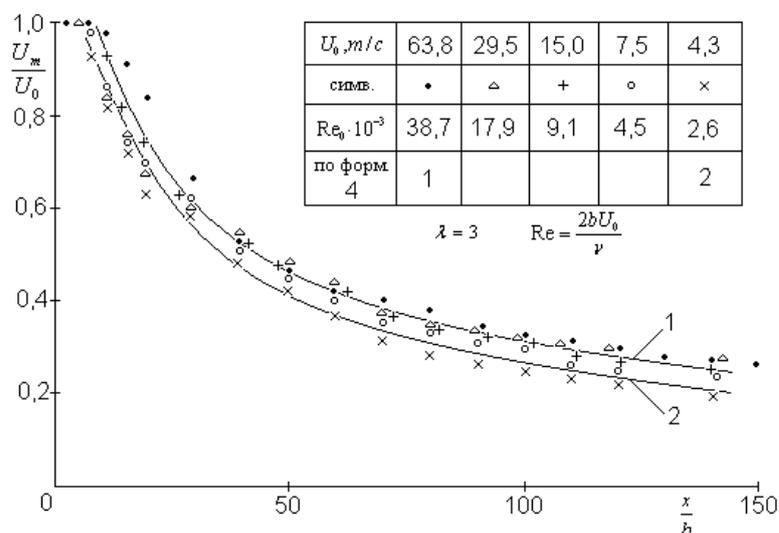


Рис. 6. Изменение осевой скорости струи

При этом следует учесть, что на рис.6 значение измеренной максимальной скорости соответствует осевой линии струи. В теоретических расчетах вычислены значения максимальной скорости, осредненные по оси z по всей высоте струи. Поэтому экспериментальные значения максимальной скорости должны быть несколько выше теоретически вычисленных значений.

Литература

1. Гиневский А.С. Теория турбулентных струй и следов. –М: 1969. – 400 с.
2. Sigalla A. Measurements of skin Friction in a Plane Turbulent Wall Jet. I. of the Royal Aeronaut. Soc., 1958, vol.62, Pt 576. p.872-877.
3. Исатаев С.И., Бердибаев М.С. Аэродинамика и теплообмен полуограниченной струи, распространяющейся вдоль конуса. Сб. «Вопросы теплообмена». Алма-Ата, 1989, - С. 86-88.
4. Исатаев С.И., Солтанбаев Ш.С. О влиянии поперечной кривизны на закономерности струи, распространяющейся вдоль цилиндрической поверхности. // Гидродинамика и диффузия. – Алма-Ата, 1982, с. 63-71.

ЖАЗЫҚ АҒЫНШАНЫҢ ӨШУІНЕ ШЕКТІК ПЛАСТИНАЛАРДАҒЫ ҮЙКЕЛІС КЕДЕРГІСІНІҢ ӘСЕРІ

С.И. Исатаев, Ғ.Төлеуов, М.С. Исатаев, М.К. Әсембаева

Жұмыста жазық еркін ағыншаның даму заңдылығына шектік пластиналардағы үйкеліс кедергісінің әсері эксперименттік түрде зерттелді. Нақты шарттарға байланысты шектік беттерде ламинар, турбулентті және өтпелі қабаттардың болатыны көрсетілген. Ағыншаның максималды жылдамдығының өзгерісі үшін эмпирикалық өрнектер алынды.

DEVELOPMENT OF VORTEX STRUCTURE OF FLAT TURBULENT JET LIMITED BY A FRONT

S. Isatayev, G. Toleuov, M. Isatayev, M. Asembaeva

It is found that there can exist three types of a large-scale vortex. In case of sufficient compression of the nozzle, the jet of current is, as a rule, laminar at the output from nozzle. Owing to unstable current in vacant frontier layer discontinuous vortexes are formed, axis of which are parallel to the nozzle edge. These vortexes either set against end plate or circled on themselves, forming vortex ring.