

Г. Толеуов¹, С.И. Лежнин², Ж.К. Сейдулла¹, Г.Н. Кантаева¹, М.Р. Султан¹

¹Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Республика Казахстан
²Институт Теплофизики Сибирского отделения Российской Академии наук, Новосибирск,

Российская Федерация

e.mail: Zhanibek.seidulla@kaznu.kz

ВЛИЯНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТРЕНИЯ ТОРЦОВЫХ ПЛАСТИН НА ЗАТУХАНИЕ ПЛОСКОЙ СТРУИ

Аннотация: В работе экспериментально исследовано влияние сопротивления трения торцовых пластин на закономерности развития плоской свободной струи. Работа посвящена экспериментальному исследованию, рассмотрены возможные виды развития крупномасштабных вихрей на начальном участке плоской струи, ограниченной торцовыми стенками, и их влияние на профили осредненного течения струи.

Для расчета влияния сопротивления трения торцовых стенок на интенсивность затухания плоской свободной турбулентной струи, было экспериментально определены закономерности изменения сопротивления на стенке. Благодаря высокому уровню турбулентности струи ожидалось, что пограничный слой на торцовых стенках должен быть турбулентным практически по всей поверхности торцовых пластинок. Однако в работе показано, что на самом деле может существовать на торцовых поверхностях ламинарный, турбулентный и переходный слои в зависимости от конкретных условий.

По экспериментальным данным было установлено, на торцовой поверхности струи при $\lambda = 16$ и начальной скорости $U_0 = 30,3$ м/с по всей длине струи до 100 калибров изменение коэффициента сопротивления трения совпадает с теоретической зависимостью для обтекания пластины однородным потоком с ламинарным пограничным слоем.

Выявлено, что может существовать на торцовых поверхностях ламинарный, турбулентный и переходный слои в зависимости от конкретных условий. Получены эмпирические выражения для изменения максимальной скорости струи.

Ключевые слова: сопло, свободной струя, турбулентное течение, экспериментальное исследование, ограничивающие пластины.

Введение

Экспериментальными исследованиями последних лет [1,2] было обнаружено, что при истечении струи из сопла прямоугольного сечения между ограничивающими с торцов плоскими пластинами, развиваются различные виды профилей скорости осредненного течения в зависимости от структуры когерентных вихрей на начальном участке струи.

В работе [3] рассмотрены возможные виды развития крупномасштабных вихрей на начальном участке плоской струи, ограниченной торцовыми стенками, и их влия-

ние на профили осредненного течения струи.

В последнее время для исследования когерентных структур течения пристенных струй уделяется большое внимание [4]. Это направление является важным объектом для исследования. Также важно продолжение исследований динамических характеристик течения. В данной работе экспериментально исследовано влияние сопротивления трения торцовых пластин на закономерности развития плоской свободной струи.

Схема экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки и направления осей координат приведены на рисунке 1. Струя истекает из прямоугольного сопла шириной $2b$ и высотой $2h$, соответствующей также расстоянию между торцовыми ограничивающими струю пластинами.

Геометрический параметр $\lambda = \frac{2h}{2b}$ ха-

рактеризует относительное удлинение выходного сечения сопла. В опытах исследовались струи при изменении λ от 3 до 25.

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 (например, в работе [5]). При значениях $\lambda > 10$ и относительно малой толщине пограничного слоя на поверхности торцовой стенки $\delta_i \ll 2b$ 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 рисунках 2-6.

Как известно, свободная струя становится турбулентной начиная с $Re > 50$ и в основном участке струи вдоль оси уровень

турбулентности $\varepsilon U_m = \frac{\sqrt{U'^2}}{U_m}$ доходит до

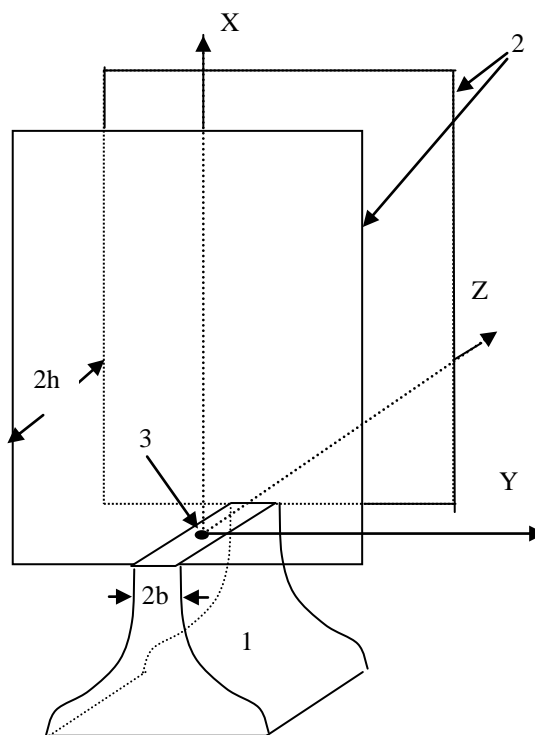
значений 20÷30%, где U_m – скорость на оси струи.

При продольном обтекании плоской поверхности однородным потоком ламинарный пограничный слой может существовать

до чисел $Re_x = \frac{U_0 x}{\nu} \leq 5 \cdot 10^5$, где x – про-

дольное расстояние, U_0 – скорость на срезе сопла. Однако, благодаря высокому уровню турбулентности струи можно было ожидать, что пограничный слой на торцовых стенках

должен быть турбулентным практически по всей поверхности торцовых пластинок.



1- сопло, 2 – ограничивающие пластины, 3- начало системы координат

Рисунок 1 - Схема экспериментальной установки

Полученные результаты и их анализ

Опыты показали, что на самом деле может существовать на торцовых поверхностях ламинарный, турбулентный и переходный слои в зависимости от конкретных условий. Например, на торцовой поверхности струи при $\lambda = 16$ и начальной скорости $U_0 = 30,3$ м/с (рисунок 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 $Re_{mx} = \frac{U_m x}{\nu}$.

Линия на рисунке 2 соответствует расчету по формуле (1).

На рисунке 3.а и 3.б приведены результаты изменений коэффициента сопротивления трения вдоль торцовой пластины по оси

течения для $\lambda = 25$ при разных значениях начальной скорости.

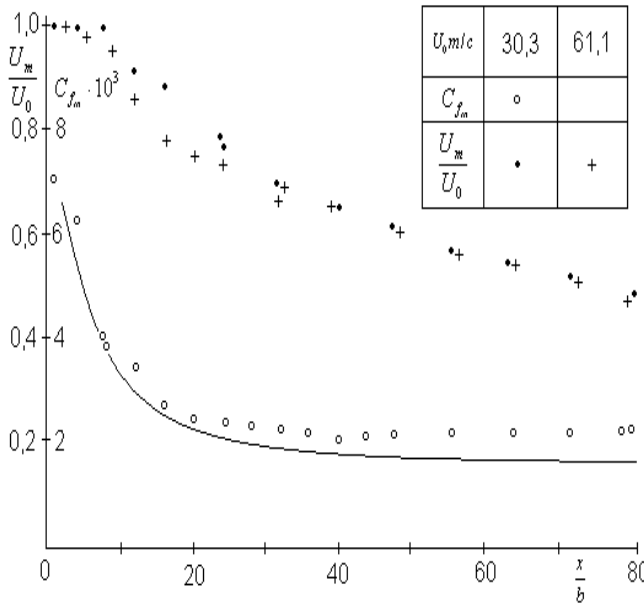


Рисунок 2 – Изменение осевой скорости и коэффициента сопротивления при $\lambda = 16$ и

$$Re_0 = \frac{U_0 2b}{\nu} = 4518$$

На рисунке 3.а видно, что при гладком сочленении торцевой 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.

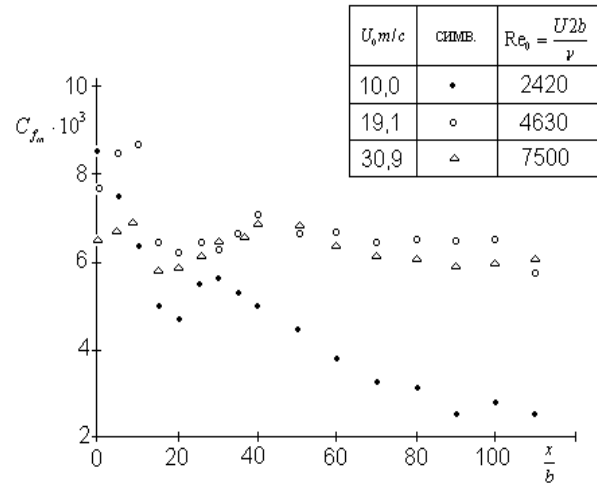
При наличии турбулизирующего выступа, высотой $\sim 0,4$ мм на границе выходного сечения сопла и торцевой стенки с самого начала образуется турбулентный пограничный слой как при обтекании однородным потоком. На рисунке 3.б линии 1 и 2 построены по теоретической зависимости

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

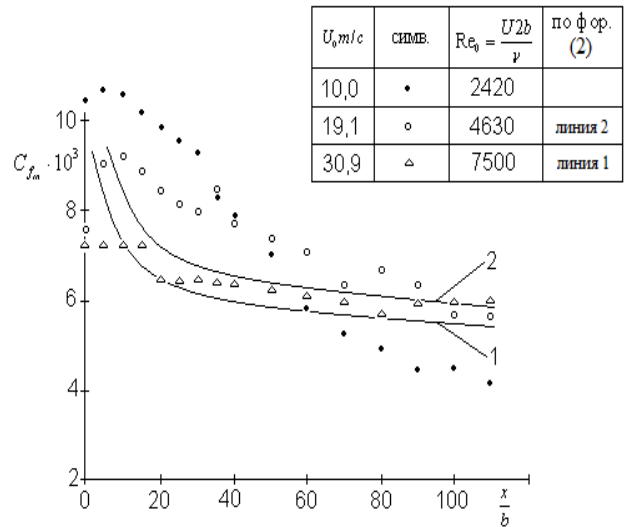
для начальной скорости струи 30,9 и 19,0 м/с.

Результаты опыта с зависимостью (2) удовлетворительно совпадают при $U_0 = 19,1$ и 30,9 м/с. Однако значения опытных дан-

ных при $U_0 = 10$ м/с не соответствует этой зависимости.



а)



а - при гладком сочленении пластины с кромкой сопла

б - при наличии турбулизатора у кромки сопла

Рисунок 3.б – Изменение коэффициента сопротивления на торцевой стенке для $\lambda = 25$

На рисунке 4 приведены результаты измерений коэффициента сопротивления трения на торцевой стенке при $\lambda = 4, U_0 = 30$ м/с. Здесь видно, что на 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).

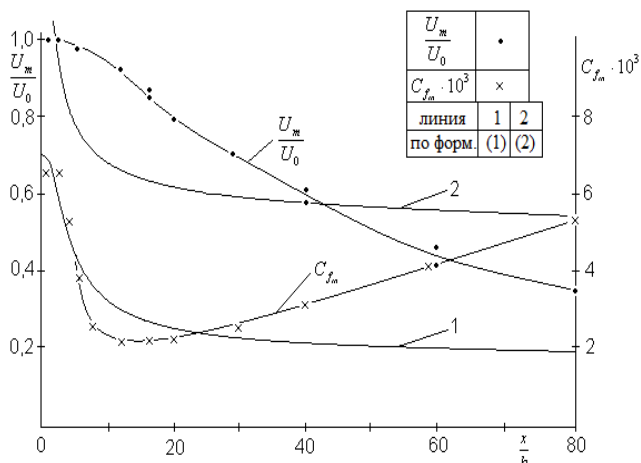


Рисунок 4 – Изменение коэффициента сопротивления трения на торцевой стенке при $\lambda = 4, U_0 = 30 \text{ м/с}$

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 рисунке 5 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 $\lambda = 4, U_0 = 30 \text{ м/с}$. 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 (рисунок 6). Причем как видно, безразмерный профиль напряжения трения совпадает с безразмерным профилем скорости.

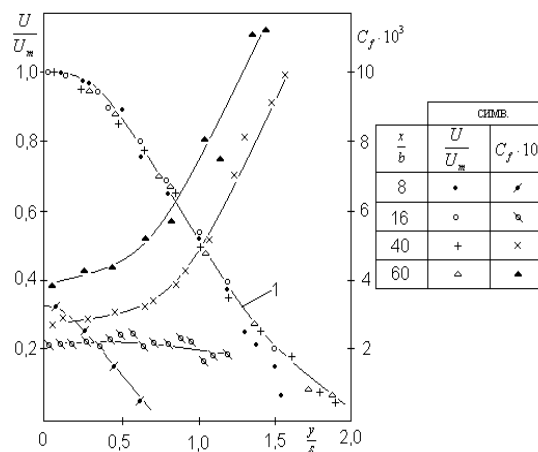


Рисунок 5 – Распределение скорости в плоскости симметрии ($z=0$) и коэффициент трения на торцевых стенках при $\lambda = 4, U_0 = 30 \text{ м/с}$

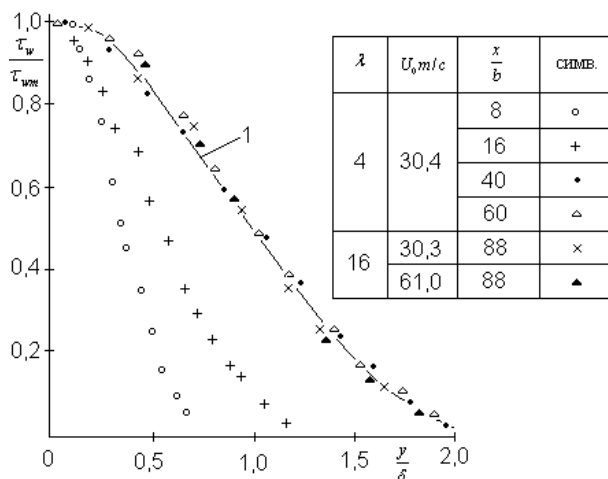


Рисунок 6 - Распределение напряжения трения на торцевых стенках

На рисунках 5 и 6 линии 1 соответствуют профилю скорости, впервые предложенный Г. Шлихтингом [6] 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 торцевых пластин на затухание струи

как при ламинарном, так и при турбулентном пограничном слоях.

Сравнение результатов расчета по формуле (4) приведено на рисунке 7 при $\lambda = 3$ и $U_0 = 4,3$ и $63,8$ м/с.

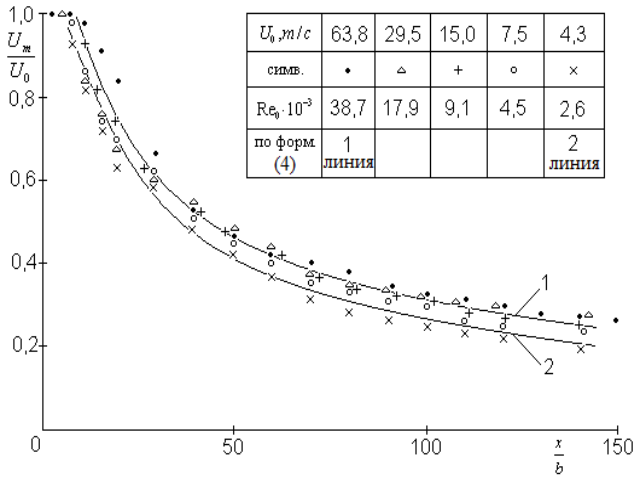


Рисунок 7 – Изменение осевой скорости струи

Заключение

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

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

где

$$A = \lambda Re_0^{0,2} N^{0,2}, \lambda = \frac{h}{b}, Re_0 = \frac{U_0 2b}{\nu}, x_0$$

– полюсное расстояние. Расчеты по этой формуле показывает, что поправка на уменьшение скорости составляет до 35 % для $\lambda < 10$.

При этом следует учесть, что на рисунке 7 значение измеренной максимальной скорости соответствует осевой линии струи. В теоретических расчетах вычислены значения максимальной скорости, осредненные по оси z по всей высоте струи. Поэтому экс-

периментальные значения максимальной скорости должны быть несколько выше теоретически вычисленных значений.

Работа выполнена в рамках проекта *Исследование проблем теплопереноса и теплообмена в сложных струйных течениях*.

Список литературы

1. Исатаев С.И., Исатаев М.С., Ползик В.В. Влияние ограничивающих торцовых стенок на изменение скорости в плоской турбулентной струе // Вестник КазНУ. Серия физическая. -№1 (8). -Алматы, 2000.– С. 171-176.
2. S.I. Isataev, G. ToleuovM. Isataev, andSh.A. Bolysbekova. Experimental investigation of three-dimensional turbulent jets issuing from a nozzle with a rectangular output section // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. -Vol. 89, -No. 2, - New York, 2016. – Pp. 391-396.
3. Исатаев М.С. Бифуркация крупномасштабных вихрей в начальном участке свободной струи, истекающей из прямоугольного сопла // 3-я Международная научная конференция «Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент». – Караганда, 2002. – С. 217-221.
4. LhendupNamgyalandJosephW. Hall. Coherent Streamwise Vortex Structures in the Near-Field of the Three-Dimensional Wall jet // *J.Fluids Eng*, 2013. -Vol.135. -№6. -Pp120-126.
5. Sigalla A. Measurements of skin Friction in a Plane Turbulent Wall Jet. I. of the Royal Aeronaut. Soc., 1958. -Vol.62, -Pt. 576. - Pp.872-877.
6. Гиневский А.С. Теория турбулентных струй и следов. –М.: Наука, 1969. – 400 с.

Принято в печать 13.11.2018

Г. Төлеуов, С.И. Лежнин*, Ж.К. Сейдулла, Г.Н. Кангаева, М.Р. Султан
Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики,
Казахский национальный университет им. аль-Фараби,
Алматы, Республика Казахстан

* - Институт Теплофизики Сибирского отделения Российской Академии наук, Новосибирск,
Российская Федерация
e.mail: Zhanibek.seidulla@kaznu.kz

ВЛИЯНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТРЕНИЯ ТОРЦОВЫХ ПЛАСТИН НА ЗАТУХАНИЕ ПЛОСКОЙ СТРУИ

Аннотация: В работе экспериментально исследовано влияние сопротивления трения торцовых пластин на закономерности развития плоской свободной струи. Работа посвящена экспериментальному исследованию, рассмотрены возможные виды развития крупномасштабных вихрей на начальном участке плоской струи, ограниченной торцовыми стенками, и их влияние на профили осредненного течения струи.

Для расчета влияния сопротивления трения торцовых стенок на интенсивность затухания плоской свободной турбулентной струи, было экспериментально определены закономерности изменения сопротивления на стенке. Благодаря высокому уровню турбулентности струи ожидалось, что пограничный слой на торцовых стенках должен быть турбулентным практически по всей поверхности торцовых пластинок. Однако в работе показано, что на самом деле может существовать на торцовых поверхностях ламинарный, турбулентный и переходный слои в зависимости от конкретных условий.

По экспериментальным данным было установлено, на торцовой поверхности струи при $\lambda = 16$ и начальной скорости $U_0 = 30,3$ м/с по всей длине струи до 100 калибров изменение коэффициента сопротивления трения совпадает с теоретической зависимостью для обтекания пластины однородным потоком с ламинарным пограничным слоем.

Выявлено, что может существовать на торцовых поверхностях ламинарный, турбулентный и переходный слои в зависимости от конкретных условий. Получены эмпирические выражения для изменения максимальной скорости струи.

Ключевые слова: сопло, свободной струя, турбулентное течение, экспериментальное исследование, ограничивающие пластины.

Г. Төлеуов, С.И. Лежнин*, Ж.Қ. Сейдулла, Г.Н. Қангаева, М.Р. Султан
Эксперименттік және теориялық физика ғылыми зерттеу институты, Әл-Фараби
атындығы Қазақ ұлттық университеті,
Алматы, Қазақстан Республикасы

* -Ресей ғылым Академиясы Сібір бөлімі Жылуфизика институты,
Новосибирск, Ресей Федерациясы

ШЕКТЕЛГЕН ПЛАСТИНАДАҒЫ ҮЙКЕЛІС КЕДЕРГІСІН ЖАЗЫҚ АҒЫНШАНЫҢ ӨШУІНЕ ӘСЕРІ

Аннотация: Жұмыста беткі қабаттардың үйкеліс төзімділігіне жазықсыз ағынның даму заңдылықтарына әсері зерттелді. Жұмыстар эксперименталды зерттеуге, соңғы қабырғалармен шектелген жазық ағыстың бастапқы бөлігінде кең ауқымды құйынды дамудың ықтимал түрлеріне және олардың реактивті орташаланған ағынының профильдеріне әсерін қарастырады.

Үстіңгі қабырғалардың үйкелісіне төзімділігі турбулентті ағынның қарқындылығына әсерін есептеу үшін эксперименттік түрде қабырғада қарсылықтың өзгеру заңдылықтары анықталды. Реактивті турбуленттіліктің жоғары деңгейіне байланысты соңғы қабырғалардың

шекаралық қабаты бет тақтайшалардың бүкіл бетіне турбулентті болуы керек деп күтілген. Алайда, ламинарлы, турбулентті және өтпелі қабаттар нақты жағдайларға байланысты соңғы беттерде іс жүзінде болуы мүмкіндігі жұмыстарда көрсетілген.

Эксперименттік деректерге сүйенсек, үйкеліс ағынының коэффициентінің өзгеруі ағынның алдыңғы бетінде ламинарлы шекаралық қабаты бар және плитаның айналасындағы біркелкі ағын үшін және теоретикалық тәуелділікте ағынның бүкіл ұзындығы бойынша бастапқы жылдамдық m / s 100 калибрліге сәйкес келеді.

Ламинарлы, турбулентті және өтпелі қабаттардың түпкілікті беттерде нақты жағдайларға байланысты болуы мүмкін екені анықталды. Максималды ағын жылдамдығын өзгертуге арналған эмпирикалық өрнектер алынады.

Түйін сөздер: сопло, еркін ағынша, турбулентті ағыс, эксперименттік зерттеу, шектегіш пластина.

G. Toleuov, S. Lezhnin, Zh. Seidulla, G. Kantayeva, M.R. Sultan

*Institute of Experimental and Theoretical Physics, Al-Farabi Kazakh national university,
Almaty, Republic of Kazakhstan*

** - Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk,
Russian Federation*

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

Abstract: In this paper, the influence of friction resistance of face plates on the regularities of the development of a flat free jet was experimentally investigated. The work is devoted to an experimental study, the possible types of development of large-scale vortices on the initial part of a flat jet bounded by end walls, and their influence on the profiles of the averaged flow of the jet are considered.

To calculate the effect of friction resistance of the end walls on the attenuation intensity of a flat free turbulent jet, the patterns of resistance change on the wall were experimentally determined. Due to the high level of jet turbulence, it was expected that the boundary layer on the end walls should be turbulent over almost the entire surface of the face plates. However, it was shown in the work that laminar, turbulent, and transition layers may actually exist on the end surfaces, depending on the specific conditions.

According to experimental data, it was found that the change in the friction drag coefficient coincides with the theoretical dependence for a uniform flow around the plate with a laminar boundary layer at the front face of the jet at and the initial velocity m / s along the entire length of the jet to 100 calibers.

It has been revealed that laminar, turbulent and transition layers may exist on the end surfaces depending on the specific conditions. Empirical expressions for changing the maximum jet velocity are obtained.

Keywords: nozzle, free jet, turbulent flow, experimental study, bounding plates.