

ПРИСОЕДИНЕНИЕ ПЛОСКОЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУИ К СТЕНКЕ В УСЛОВИЯХ ВДУВА И ОТСОСА

УДК 532.517.4

С. В. Алексеенко, Д. М. Маркович

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
630090 Новосибирск

При распространении плоской затопленной турбулентной струи вблизи твердой поверхности наблюдается так называемый эффект Коанда [1–3]. Причина эффекта заключается в эжектирующих свойствах струй. Наличие близко расположенной стенки затрудняет подвод жидкости к плоской струе, вследствие чего между струей и стенкой образуется зона разрежения. В результате возникающего перепада давления струя изгибается и присоединяется к стенке в некоторой точке с координатой X_R . В двумерной системе такое состояние является устойчивым.

Эффект Коанда проявляется и часто определяет процессы тепло- и массообмена в камерах смешения и топочных устройствах, при струйном нагреве и охлаждении твердых тел, при струйной паровой очистке поверхностей нагрева, в пневмотехнике и системах вентиляции. Так, при присоединении пылеугольного факела к стенке топочной камеры происходит интенсивное шлакование настенных экранов, а также ухудшение выгорания топливных частиц, что резко снижает эксплуатационные характеристики котла.

В литературе присоединение струи к стенке изучено довольно подробно в случае, когда струя истекает параллельно или наклонно к плоской поверхности [1–3]. Значительная часть работ связана с техническими приложениями. Например, в пневмотехнике необходимо знать лишь текущее положение струи из двух возможных состояний при воздействии управляющего сигнала [4]. В то же время описание структуры потока отсутствует. Особенно важное значение имеет окрестность точки присоединения, где наиболее резко изменяются гидродинамические и теплофизические параметры и наиболее интенсивно протекают процессы тепломассообмена [5, 6].

В данной работе впервые изучены характеристики присоединяющейся турбулентной струи при воздействии управляющих потоков разного типа. Новые данные по структуре течения в окрестности критической точки (точки присоединения) получены благодаря применению двойных электродиффузионных микродатчиков трения.

С целью изучения фундаментальных закономерностей присоединения турбулентных струй к стенке в условиях вдува и отсоса был создан специальный гидродинамический стенд. Рабочий участок (рис. 1) представляет собой вертикальный прямоугольный канал 1, изготовленный из оргстекла с внутренними размерами $86 \times 162 \times 1600$ мм. Плоская струя 2 истекает из прямоугольного профилированного сопла 3 шириной $2h$ и длиной 86 мм. Длина сопла равна ширине канала, вследствие чего реализуется двумерное течение, по крайней мере, на не слишком больших удалениях от сопла.

Поскольку причиной присоединения струи к стенке является поперечный перепад давления, естественно использовать для управления такой системой вдув (или отсос) в зону разрежения 4. Очевидно также, что результирующий эффект должен зависеть от способа вдува. В эксперименте применялись три основных, принципиально отличных друг от друга типа управляющего течения (рис. 1). Тип 0 соответствует диффузионному вдуву через перфорированную пластину 5. В этом случае вводимый поток импульса пренебрежимо мал, что отвечает положениям интегрального подхода [2, 3]. Управляющий поток типа 1 организуется через щелевое сопло 6 перпендикулярно основной струе. Здесь потоки

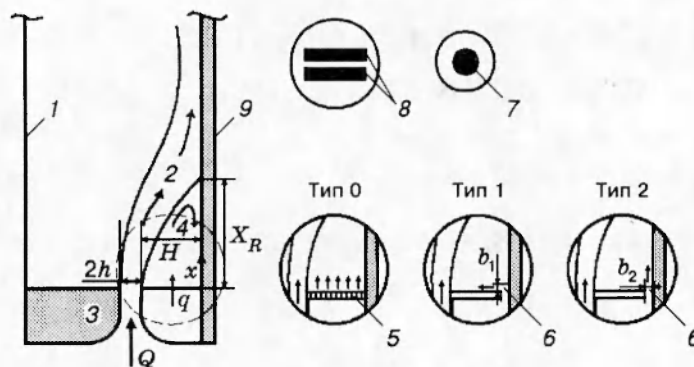


Рис. 1

импульса в основной и управляющей струях уже могут быть сравнимы по абсолютной величине, а по направлению они взаимно перпендикулярны. Управляющий поток типа 2 формируется также в виде пристенной струи, но направленной вдоль основного течения.

При исследовании присоединяющихся течений обычно измеряют распределения статического давления на стенке и положение точки присоединения. Другой важный гидродинамический параметр — касательное напряжение на твердой поверхности, которое связано с процессами тепломассопереноса и крайне важно для определения пристенной структуры присоединенных турбулентных течений. Однако в силу сложности измерений этой величины (особенно в сильно изменяющихся турбулентных потоках) подобные данные в литературе практически отсутствуют.

В настоящей работе локальные значения касательных напряжений измерялись посредством электродиффузионного метода [7]. Использовались одиночные микродатчики трения 7 диаметром 100 мкм, а также двойные датчики 8 с размером чувствительного элемента по потоку 30 мкм и зазором между ними 15 мкм. Столь малые размеры датчиков позволяют измерять локальную структуру течения и турбулентные характеристики. Электродиффузионные датчики трения и отверстия для отбора статического давления располагались на правой стенке канала 9, которая могла передвигаться в вертикальном направлении с шагом 0,1 мм.

Принципиальным моментом в методике эксперимента является применение двойных датчиков, которые чувствительны к направлению потока. В окрестности критической точки за счет турбулентных пульсаций поток хаотически меняет свое направление (в данном случае преобладают продольные пульсации). Поэтому корректные измерения среднего трения и турбулентных характеристик возможно произвести лишь с помощью двойного датчика, т. е. датчика, чувствительного к направлению потока. И лишь таким способом можно точно определить точку присоединения (критическую точку), где среднее трение равно нулю. Детали электродиффузионного метода приведены в [7].

На рис. 2 показаны характерные картины присоединяющегося течения в зависимости от типа управляющего потока: *a* — диффузионный вдув (тип 0), $q/Q = 0,25$, *b* — поперечный вдув (тип 1), $q/Q = 0,25$, *в* — продольный вдув (тип 2), $q/Q = 0,25$, *г* — отсос, $q/Q = -0,15$. Визуализация течения производилась мелкими пузырьками воздуха при освещении световым ножом в центральном сечении канала. Здесь q — объемный расход жидкости в управляющем потоке; Q — расход в основном потоке; безразмерная величина q/Q — параметр вдува, положительное значение которого соответствует вдуву, а отрицательное — отсосу.

Как следует из рис. 2, структура присоединяющегося потока существенно зависит от способа вдува. В случае диффузионного вдува траектория струи становится более прямой

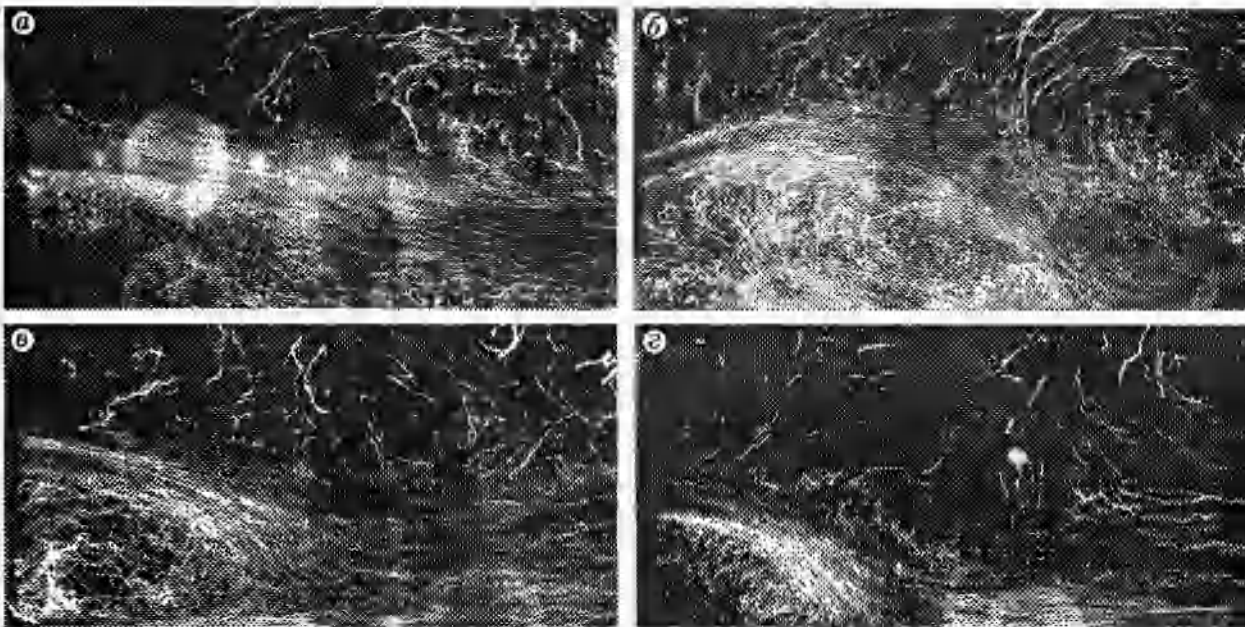


Рис. 2

по сравнению с вариантом, когда вдув отсутствует, точка присоединения смещается вниз по потоку, а интенсивность вихревого движения в рециркуляционной зоне резко снижается. Поперечный вдув, наоборот, приводит к сильному искривлению струи и способствует образованию крупномасштабного вихря. Продольный вдув формирует структуру течения, аналогичную случаю двух взаимодействующих параллельных струй [2, 3, 8]. На рис. 2, б отчетливо выделяются пристенная струя и свободная точка застоя. В [2, 3] показано, что на характер взаимодействия двух струй влияет соотношение как расходов, так и потоков импульса.

Отсос независимо от способа его организации увеличивает искривление струи и приводит к формированию интенсивного вихря вблизи точки присоединения (рис. 2, г).

Рис. 3–7 демонстрируют влияние типа и величины управляющего потока на распределение локального коэффициента давления $C_{pw} = (P_w - P_0)/(\rho U_0^2/2)$ (P_w и P_0 — статическое давление на стенке и в ядре потока соответственно, ρ — плотность жидкости, U_0 — скорость жидкости на срезе сопла). По оси абсцисс отложены значения продольной координаты x , отнесенные к расстоянию H между кромкой сопла и стенкой (см. рис. 1). Опыты проводились в автомодельной по числу Рейнольдса области. Поэтому экспериментальные данные приведены для одного значения числа Рейнольдса: $Re = U_0 2h/\nu = 4,65 \cdot 10^4$ ($2h = 12$ мм — ширина сопла, ν — кинематическая вязкость). Геометрические параметры системы следующие: $H = 48$ мм, $b_1 = b_2 = 3$ мм.

На рис. 3 представлены данные по распределению статического давления вдоль стенки в зависимости от типа управляющего потока. В отсутствие вдува ($q = 0$) экспериментальные кривые имеют характерную форму с локальным максимумом в точке присоединения и слабой вариацией в зоне рециркуляции. Как диффузионный, так и поперечный струйный способ вдува приводят к смещению максимума давления вниз по потоку примерно на одно и то же расстояние. При этом кривые распределения остаются подобными по форме, но максимальные перепады давления существенно различны. Струйный продольный вдув заметно трансформирует распределение давления, что связано со сложным характером взаимодействия между основным струйным потоком и пристенной струей. Причем

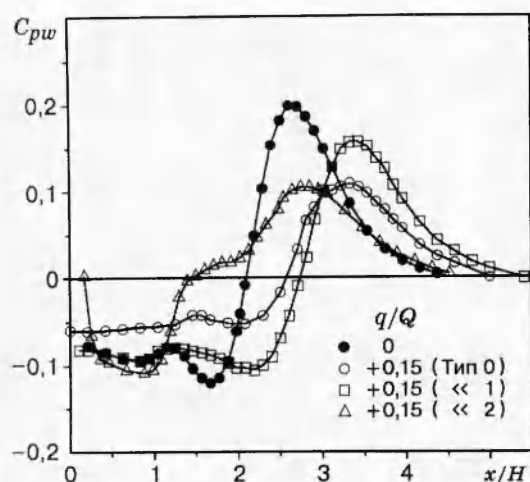


Рис. 3

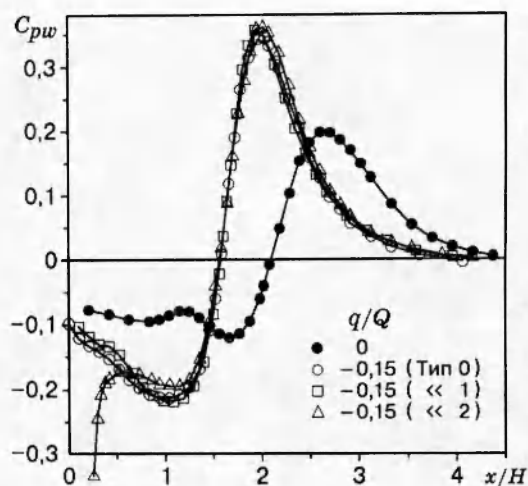


Рис. 4

величина максимума давления снижается в 2 раза, но точка присоединения не смещается. Способ организации отсоса в отличие от вдува не влияет на распределения давления, как это видно из рис. 4, за исключением окрестности торцевой стенки.

Рассмотрим по отдельности воздействие различных типов управляющего потока на донное давление. Диффузионный вдув монотонно трансформирует профили давления с изменением расхода q управляющего потока (рис. 5). Подобное поведение распределений давления наблюдалось также для радиальной струи при ее управлении поперечным потоком [9].

Более сложная эволюция профилей давления происходит при управлении струей путем поперечного вдува (рис. 6). С увеличением расхода q расстояние до точки присоединения всегда растет. Однако максимальные значения давления имеют локальный минимум при некотором значении q/Q (рис. 8).

Еще более сложное поведение профилей давления наблюдается в случае продольно-

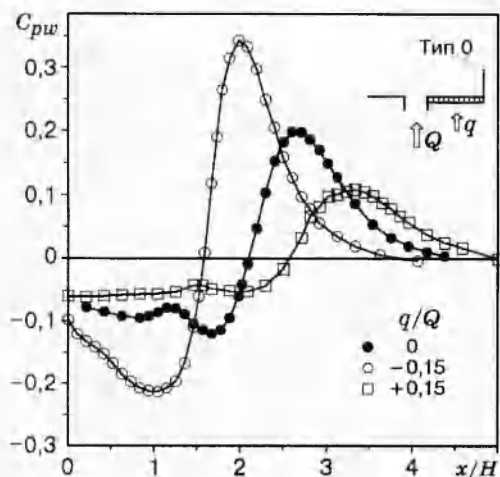


Рис. 5

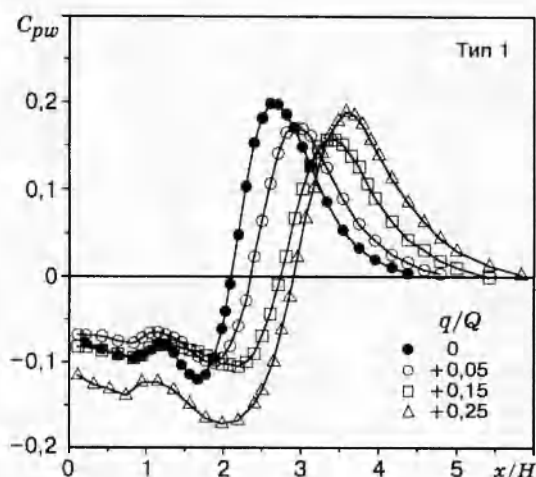


Рис. 6

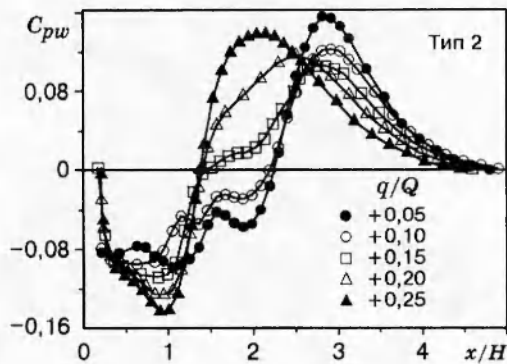


Рис. 7

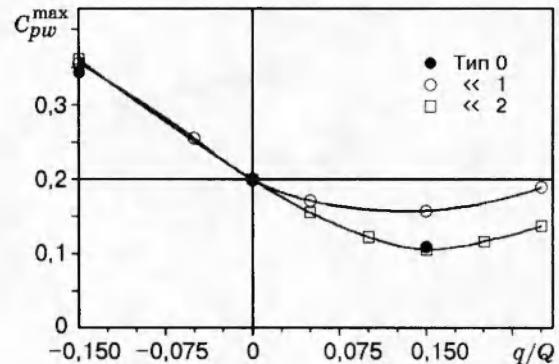


Рис. 8

го струйного вдува (рис. 7). Координата максимума давления (которая отождествляется здесь с точкой присоединения) вначале растет с увеличением относительного расхода q/Q вплоть до значения 0,05, а затем резко уменьшается. Визуализация течения показывает, что при малых величинах вдува ($q/Q < 0,1$) управляющая пристенная струя отрывается от стенки в зоне рециркуляции, и воздействие продольного струйного вдува эквивалентно случаю других способов управления. Однако при $q/Q > 0,15$ (см. рис. 2,з) пристенная струя существует вплоть до окрестности точки присоединения основной струи. Таким образом, реализуется система двух взаимодействующих, параллельно истекающих плоских струй в присутствии твердой стенки. При этом точка соединения двух струй (определяется как точка разветвления линий тока) находится в ядре потока. А некоторую эквивалентную точку присоединения основной струи к стенке можно определить как точку максимума донного давления. В [2] показано, что даже для двух свободных, параллельно истекающих неодинаковых плоских струй точка соединения смещается немонотонно с изменением соотношения потоков импульса. Рис. 8 демонстрирует влияние типа и величины управляющего потока на максимальное значение коэффициента давления.

Данные по касательным напряжениям на стенке, полученные двойным электродиффузионным датчиком трения, представлены на рис. 9 для диффузионного вдува. Здесь коэффициент трения $C_f = \tau_w / (\rho U_0^2 / 2)$ (τ_w — локальное осредненное по времени касательное напряжение, τ_w' — среднеквадратичные пульсации трения, τ_w^{\max} — максимальное осредненное по времени трение). Следует отметить, что точное значение среднего трения в окрестности критической точки турбулентного потока можно измерить только двойным датчиком, который позволяет определить вектор трения. Отрицательные значения трения на рис. 9 соответствуют возвратному течению в зоне рециркуляции, а нулевое значение — критической точке или точке присоединения.

Как видно из рис. 9, а, б, влияние управляющего потока на профили среднего трения примерно такое же, как и на профили давления. Наиболее примечательным фактом является то, что максимальное и минимальное значения трения имеют один и тот же порядок по модулю, хотя присоединяющаяся струя разделяется на два сильно неодинаковых потока. Следовательно, общепринятое предположение [2] о рециркуляционной зоне как застойной несправедливо и нуждается в корректировке. Другой важный вывод заключается в том, что максимум давления не совпадает с точкой нулевого трения и лежит ниже по потоку (до 10 %). Полное совпадение наблюдается только для импактных струй, падающих нормально к стенке.

Максимальные значения пульсаций трения имеют место в непосредственной окрестности критической точки (рис. 9, в). С удалением от критической точки уровень турбу-

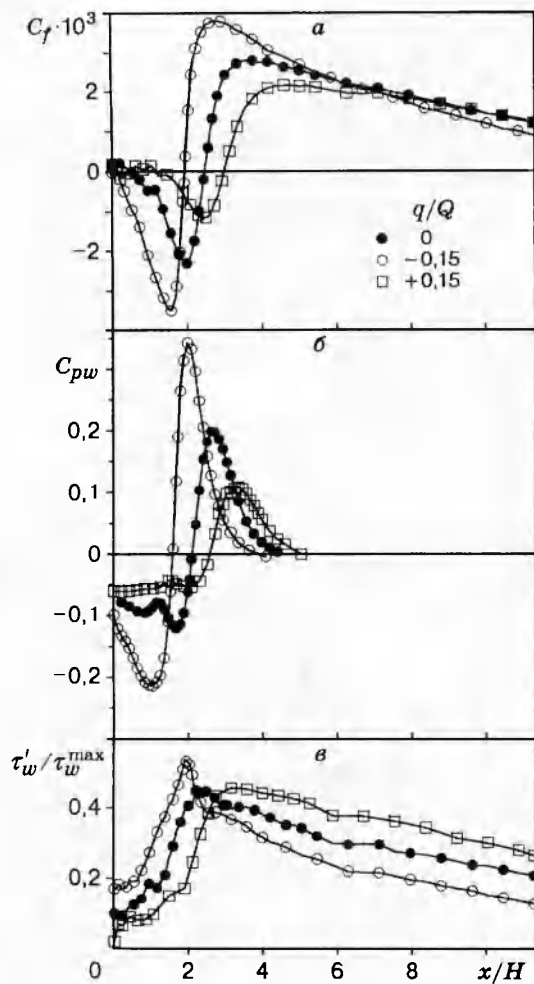


Рис. 9

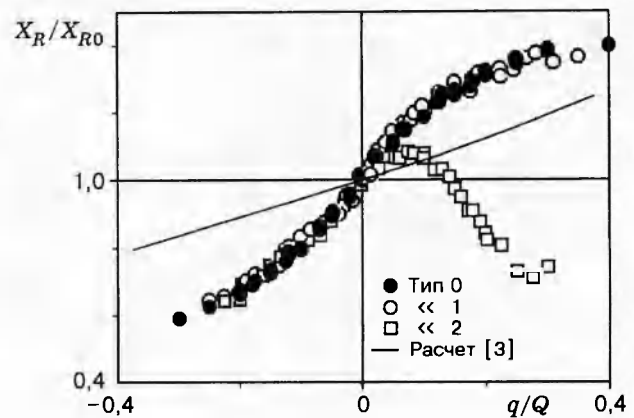


Рис. 10

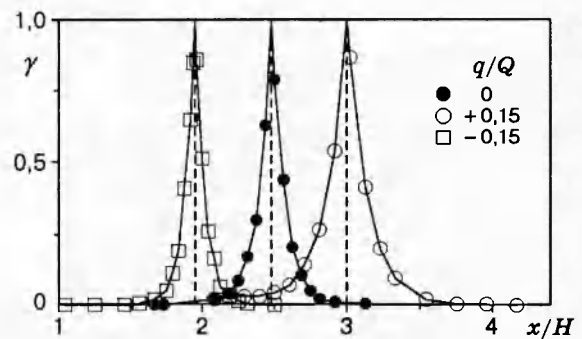


Рис. 11

лентности монотонно снижается.

На рис. 10 представлены данные по координате точки присоединения X_R , полученные на основе измерений распределений давления или трения. Здесь X_{R0} — координата точки присоединения в отсутствие управляющего потока. Как видно, диффузионный и поперечный струйный способы управления одинаково влияют на точку присоединения, координата которой монотонно меняется с величиной расхода управляющего потока. Продольный струйный вдув почти всегда приводит к сокращению зоны рециркуляции и неудобен для задач управления. Однако пристенная струя в силу сохранения своей индивидуальности может играть роль пристенной струйной завесы и защищать стенку от высокотемпературных присоединяющихся струй в теплообменных аппаратах и камерах сгорания.

Линия на рис. 10 построена по интегральной теории [3], учитывающей диффузионный вдув (отсос) в зону рециркуляции. Из рис. 10 следует, что пока говорить можно только о качественном согласии между теорией и экспериментом.

Как отмечено выше, окрестность критической точки является наиболее важной, но и наиболее трудной для изучения в силу существования локальных отрывов и нестационарных возвратных течений. Чтобы охарактеризовать структуру турбулентного пристенного течения в этой области, нами введен коэффициент обратных течений γ [7], который измеряется двойным электродиффузионным датчиком трения и определяется как $\gamma = t_-/t_+$ (t_- , t_+ — время существования обратного и прямого течения у стенки соответственно).

Распределения коэффициента γ в зависимости от величины диффузионного вдува приведены на рис. 11. По этим данным точно находится положение критической точки, а также легко оценивается ширина области существования нестационарных возвратных течений. Так, для $q/Q = 0$, $H = 48$ мм и ширины основного сопла $2h = 12$ мм размеры области порядка 8 мм. Обращает на себя внимание факт симметрии кривых распределения γ , хотя течение вблизи точки присоединения явно асимметрично.

Таким образом, в настоящей работе экспериментально изучено присоединение плоских турбулентных струй к стенке при воздействии основных типов управляющего потока и благодаря применению двойных электродиффузионных микродатчиков трения получены новые данные о структуре пристенных турбулентных течений в окрестности точки присоединения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sawyer R. A. The flow due to two-dimensional jet issuing parallel to a flat plate // J. Fluid Mech. 1960. V. 9, N 4. P. 543–560.
2. Алексеенко С. В. Взаимодействие плоских турбулентных струй // Сиб. физ.-техн. журн. 1991. Вып. 1. С. 62–71.
3. Alekseenko S. V., Markovich D. M. Interaction of plane turbulent jets // Rus. J. Eng. Thermophysics. 1995. V. 5. P. 125–143.
4. Залманзон Л. А. Аэродинамические методы измерения входных параметров автоматических систем. М.: Наука, 1973.
5. Дыбан Е. П., Мазур А. И. Конвективный теплообмен при струйном обтекании тел. Киев: Наук. думка, 1982.
6. Юдаев Б. Н., Михайлов М. С., Савин В. К. Теплообмен при взаимодействии струй с преградами. М.: Машиностроение, 1977.
7. Alekseenko S. V., Markovich D. M. Electrodiffusion diagnostic of wall shear stresses in impinging jets // J. Appl. Electrochemistry. 1994. V. 24. P. 626–631.
8. Miller D. R., Comings E. W. Force-momentum fields in a dual-jet // J. Fluid Mech. 1960. V. 7. P. 237–265.
9. Tanaka T., Tanaka E., Nagaya S. Study on control of radial attaching jet flow. Pt 2 // Bull. JSME. 1986. V. 29, N 253. P. 2049–2054.

Поступила в редакцию 9/1 1996 г.
