М 334978

НА ДОМ НЕ ВЫДАЕТСЯ

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

Московское ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое училище им. Н.Э. Баумана

На правах рукописи

АРАЛОВ АЛЕКСАНДР ДМИТРИЕВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА В ОБЛАСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТРУИ С ПРЕГРАДОЙ ПРИ АКТИВНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ЕЕ НАЧАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Специальность 05.14.05 - теоретические основы теплотехники

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1978.

Работа выполнена в Московском ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище имени Н.Э. Баумана.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана
1334978
Аралов А.Д. Исследование п

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Юдаев Б.Н.

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор Бородачев В.Я
кандидат технических наук, доцент Панков О.М.

Ведущее предприятие – Институт технической теплофизики АН УССР.

Защита диссертации состоится "20" ноября 1978г. в 15[30] часов на заседании специализированного совета по тепловым машинам и теорети
им. Н.Э. Баумана (шиф
Лефортовская набережна
ностроение ".

С диссертацией мо
Баумана.

Автореферат разос

Ваши отзывы в 2-х
выслать по адресу: Мос
МВТУ, ученому секретар

Ученый секрет
специализированного с
к.т.н., доцент

М 334978

Л 72169 Подп. к печати

Общая характеристика работы

Актуальность. Интенсивность теплообмена в области взаимодействия струй с преградами из-за высокой степени турбулентности и некоторых других факторов примерно на порядок выше по сравнению со всеми другими способами подвода теплоносителя при прочих равных условиях.При использовании струй есть возможность автоматизировать управление теплообменом.

В последнее время возрос интерес к процессам турбулентного тепло -и массообмена в струйных потоках (как с естественной, так и с наведенной турбулентностью) и процессам теплообмена между струями и преградами.

На локальные и средние коэффициенты теплоотдачи в градиентной области течения оказывает влияние гидродинамика свободной и веерной струи на преграде.При изменении параметров свободной струи изменяются параметры в области взаимодействия.Процесс взаимодействия струи с преградой весьма сложен,а экспериментальных и теоретических данных,позволяющих расчитать теплообмен,в настоящее время нет.

№334978ф

Цель работы. Экспериментальное и теоретическое исследование влияния активного воздействия или наведенной турбулентности путем вдува в корневую часть осесимметричной струи (параметра вдува $K_в$,который получен в работе,рис.I) и механическим турбулизатором (числа Струхаля Sh ,рис.2) на гидродинамику струйных потоков (затопленные и веерные струи) ,пристенный пограничный слой и теплообмен в области взаимодействия струи с преградой.

Разработка методов расчета основных гидродинамических параметров струйных потоков и теплоотдачи при натекании струи на преграду.

Научная новизна. Впервые получены экспериментальные и расчетные данные по влиянию наведенной турбулентности на гидродинамику струйных потоков и теплообмен в градиентной области течения.

Впервые показана возможность управлять процессами теплообмена между струями с наведенной турбулентностью и преградами,помещенными в них.

Практическая ценность работы состоит: в создании метода

расчета гидродинамических параметров и теплообмена при наведенной турбулентности;

в разработке конкретных устройств, позволяющих регулировать параметры струйных потоков и теплообмен при взаимодействии струи с преградой.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы в ряде практических случаев: струйное охлаждение камер горения и лопаток газовых турбин, нагревание слябов в методических печах, термообработка листового металла и коленчатых валов, отжиг керамической плитки, очистка самолетов и аэродромов от наледи, охлаждение радиоэлектронной аппаратуры и т.п. Некоторые элементы конструкций, объекты новой техники можно охлаждать только струями капельных или газовых жидкостей.

Реализация. Разработанный в диссертации метод внедрен в практику расчета теплообмена в окрестности критической точки и градиентной области течения при взаимодействии высокотемпературной газовой струи турбо-реактивного двигателя ТРД ВК-1а с поверхностями некоторых конструкций.

Апробация работы. Основные разделы диссертации докладывались на Всесоюзной школе-семинаре " Газодинамика и теплообмен в энергетических установках " в г. Иванове, 1977 г., на научно-технических семинарах кафедры " Термодинамика и теплопередача" МВТУ им. Баумана, 1976, 1977 г.

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 8 печатных работ и 5 научно-технических отчетов МВТУ им. Н.Э. Баумана.

Объем работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 6 глав, выводов, содержит 112 страниц машинописного текста, 86 рисунков. Список литературы включает 64 наименования на русском языке и 23 на иностранных языках.

I. Исследование гидродинамики и теплообмена при взаимодействии струй с преградами.

В настоящее время количественный расчет осредненного течения в струе доводится до конца только с введением некоторых эмпирических констант. Для решения задачи о распространении затопленной турбулентной струи профиль рейнольдсова напряжения сдвига в поперечных сечениях струи, представляется, по методу Федяевского К.К., в виде полинома по степеням расстояния от оси симметрии $\tau = \sum_{i=0}^{n} C_i r_i$. Используется условие на оси симметрии и полуэмпирическая формула Прандтля для турбулентного трения $\tau = \varepsilon \rho \, \partial W_y / \partial r = \varkappa \rho W_0 R_c \, \partial W_y / \partial r$. Здесь ε - коэффициент турбулентной кинематической вязкости, который полагается неизменным поперек пограничного слоя, $\varkappa$ - эмпирическая константа, зависящая от турбулентности, R_c - радиус струи, W_0 - скорость на оси струи, ρ - плотность.

Путем решения системы уравнений, описывающих распространение затопленной струи при постоянном давлении во внешней среде, получают расчетный профиль скорости в поперечных сечениях струи $\bar{W}_y = W_y / W_0 = 1 - 6\bar{R}^2 + 8\bar{R}^3 - 3\bar{R}^4$, который находится в удовлетворительном согласовании с экспериментальными данными автора и других исследователей, рис. I. Здесь $\bar{R} = r / R_c$ - текущий радиус струи в безразмерном виде, $r_{1/2}$ - радиус струи, где скорость равна половине скорости на оси струи $W_y = 1/2 \, W_0$.

Используя условие постоянства импульса в поперечных сечениях струи, с учетом изменения константы $\varkappa$ и длины участка струи $\bar{h}_н$ (где $W_0 = W_D$) в струе с наведенной турбулентностью, в работе получена формула, описывающая распределение скорости вдоль оси затопленной струи:

$$\bar{W}_0 = \frac{W_0}{W_D} = \left(1 + CA^{n} - C_1 A^{-n_1}\right)^{-1}; \quad A = K_в; Sh. \qquad (I)$$

Для струи с вдувом: при $16 \geqslant \bar{h} > \bar{h}_н$, $K_{в.0} \geqslant K_в > 0{,}2$, $C = 0{,}202$, $n = 0{,}20$, $C_I = 0{,}64$, $n_I = 0$.

Для струи с механическим турбулизатором: при $5 > \bar{h} > 0$, $0{,}09 \geqslant Sh > 0{,}02$, $C = 3{,}58$, $n = I{,}72$, $C_I = 4{,}97$, $n_I = I{,}459$; $0{,}24 > Sh \geqslant 0{,}09$; $- 0{,}63$, $-I{,}0$, $- 0{,}0033$, $- I{,}577$; при $I6 > \bar{h} > 5$, $0{,}09 \geqslant$

$Sh > 0,02,- 0,259,- 0,183,- 0,727,- 0,012; 0,24 > Sh \geq 0,09,- 0,378,- 0,340,- 0,225,- 0,500.$

Здесь $\bar{h} = h/D$, h - расстояние от среза сопла, D - диаметр сопла, W_D - скорость на срезе сопла.

С увеличением чисел $K_в$ и Sh происходит перестройка течения в струе: скорость на оси струи W_o уменьшается, а турбулентность $\varepsilon = \sqrt{\overline{\omega}_o^{12}}/W_D$ растет до своего максимального значения, а затем уменьшается тем интенсивнее, чем выше значения $K_в$ и Sh. Максимум ε при этом увеличивается и перемещается вверх по потоку.

При натекании струи на преграду последняя начинает оказывать влияние на распределение скорости и (как показано в работе) турбулентности вдоль оси струи на расстоянии от нее, вверх по потоку, равном $\bar{y}_* = y_*/D = 1,2...1,3$. В области торможения от $\bar{y}_* = 1,2...1,3$ до $\bar{y}_* = 0$ скорость резко уменьшается вплоть до нуля, а турбулентность $\varepsilon_{oy} = \sqrt{\overline{\omega}_{oy}^{12}}/W_{oy}$ резко возрастает. Сравнение течений свободных струй и струй натекающих на преграду показывает, что во-втором случае интенсивность турбулентности на 5...60% выше, в диапазоне обследованных параметров.

В работе показано, что параметр $\bar{h}$ существенно влияет на гидродинамические параметры в пристенном пограничном слое даже при взаимодействии преграды и струи с естественной турбулентностью.

При расстекании струи по преграде скорость на внешней границе пристенного пограничного слоя W_m (при определенном значении $\bar{h}$) растет по мере удаления от критической точки до максимального значения W_*, а затем уменьшается. Турбулентность $\varepsilon_m = \sqrt{\overline{\omega}_m^{12}}/W_m$ при этом уменьшается до минимума, а затем растет. С увеличением расстояния $\bar{h}$ уменьшается W_m, а расстояние от критической точки z_* (расстояние где W_m имеет максимальное значение W_*) и ε_m увеличиваются. На основании результатов измерения профилей пульсаций и скорости по толщине пограничного слоя в работе показано, что с увеличением расстояния между преградой и срезом сопла до определенного $\bar{h} = \bar{h}_*$ интенсивность проникновения пульсаций в пограничный слой растет, профили скорости становятся более наполненными (рис.2). При дальнейшем увеличении $\bar{h}$ интенсивность проникновения пульсаций уменьшается, профили скорости становятся менее напол-

ненными.

В работе впервые показано влияние наведенной турбулентности (чисел $K_в$ и Sh) на гидродинамические параметры в пристенном пограничном слое.

Если преграда находится в начальном участке струи $\bar{h}_н$, увеличение чисел $K_в$ и Sh приводит к уменьшению значения скорости W_m и W_*, увеличению расстояния z_* и интенсивности проникновения пульсаций в пограничный слой. Профили скорости становятся более наполненными (рис.2). При $\bar{h} > \bar{h}_н$ с ростом $K_в$ и Sh уменьшаются W_m, W_*, интенсивность проникновения пульсаций, а z_* увеличивается. Профили скорости становятся менее наполненными.

Изменение гидродинамических параметров и структуры течения в пограничном слое объясняется тем, что с изменением чисел $K_в$ и Sh происходит перестройка течения в свободной струе.

В работе получены зависимости W_m, W_* и z_* от $K_в$, Sh и $\bar{h}$.

Функции, описывающие изменение W_m в области ускоренного течения ($z_* \geq z > 0$), имеют вид:

$$\frac{W_m}{W_*} = C\left(\frac{z}{z_*}\right) - C_1\left(\frac{z}{z_*}\right)^3; \quad C_1 = C-1, \quad 1{,}5 \geq C \geq 1{,}0; \qquad (2)$$

$$\frac{W_m}{W_*} = C\left(\frac{z}{z_*}\right) - C\left(\frac{z}{z_*}\right)^3 + \left(\frac{z}{z_*}\right)^4; \quad 2 \geq C > 1{,}5, \qquad (3)$$

где для струи с вдувом

$$\begin{aligned} C &= 1{,}04\,\bar{h}^{0{,}377}K_в^{0{,}164}; & \bar{h} &= \bar{h}_н, \\ C &= 0{,}877\,\bar{h}^{0{,}508}K_в^{0{,}168}; & \bar{h}_т &> \bar{h} > \bar{h}_н, \\ C &= 2; & \bar{h} &> \bar{h}_т; \end{aligned} \qquad (4)$$

для струи с механическим турбулизатором

$$\begin{aligned} C &= 0{,}791\,\bar{h}^{0{,}377}; & \bar{h} &= \bar{h}_н, \\ C &= 0{,}660\,\bar{h}^{0{,}533}; & 8 &> \bar{h} > \bar{h}_н, \\ C &= 2; & \bar{h} &\geq 8. \end{aligned} \qquad (5)$$

Значения W_* и z_* определяются выражениями

$$\frac{W_*}{W_D} = C\,\bar{h}^{-n}A^{-m}; \quad A = K_в; Sh; \qquad (6)$$

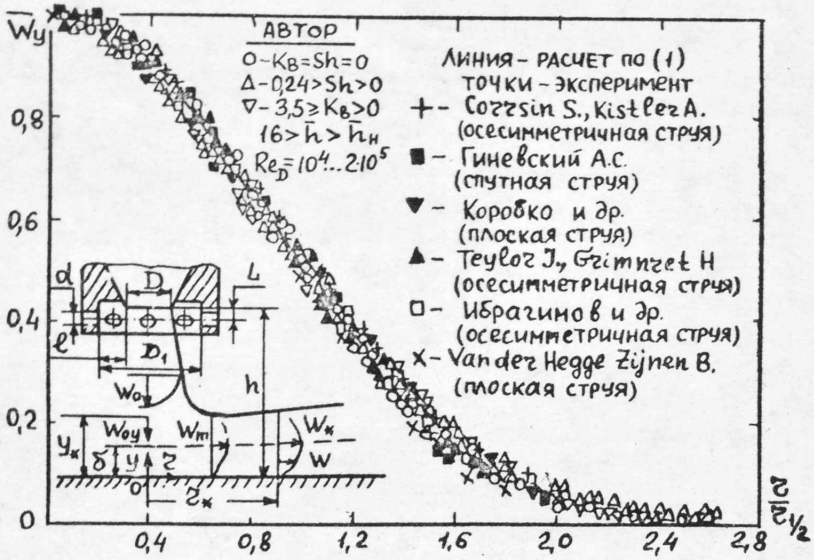


Рис.I.Сравнение расчетного и экспериментального профиля скорости в поперечных сечениях основного участка струи.

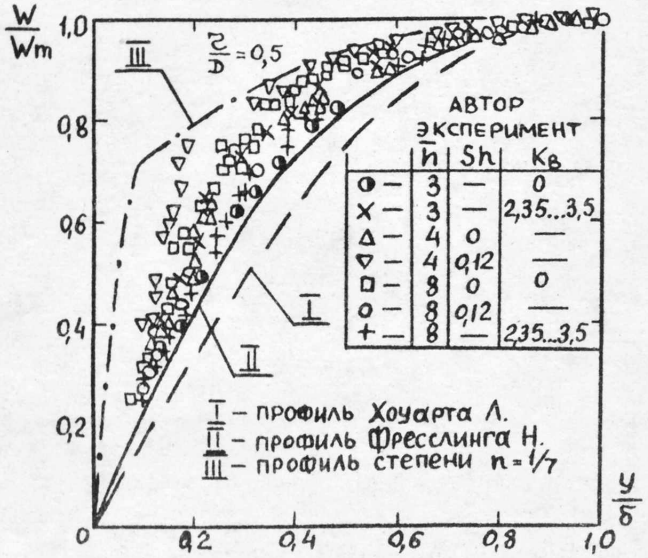


Рис.2.Изменение профиля скорости в пристенном пограничном слое в области ускоренного течения.

$$\frac{z_*}{D} = C_1 \bar{h}^{n_1} A^{m_1}; \quad A = K_B; Sh, \qquad (7)$$

где для струи с вдувом: при $K_{B.0} \geqslant K_B > 0,2$; $\bar{h} = \bar{h}_H$, $C = 0,91$, $n = 0,327$, $m = 0,166$, $C_I = 0,84$, $n_1 = 0,115$, $m_1 = "-" 0,09$; $\bar{h}_T \geqslant \bar{h} > \bar{h}_H$, - 0,908, - 0,325, - 0,165, - 0,594, - 0,4, -"-"0,09; $\bar{h} > \bar{h}_T$, 1,919, - 0,768, - 0,313, - 0,233, - 0,071; для струи с механическим турбулизатором: $\bar{h}_H \geqslant \bar{h} > 1,5$, $0,11 \geqslant Sh > 0,02$, $C = 1,22$, $n = 0,327$, $m = 0$, $C_I = 0,977$, $n_1 = 0,115$, $m_1 = 0$; $8 > \bar{h} > \bar{h}_H$: $0,09 \geqslant Sh > 0,02$, - 1,198, - 0,45, - 0,05, - 0,8837, - 0,3, - 0,037; $0,24 > Sh \geqslant 0,09$, - 0,739, - 0,45, - 0,25, - 1,053, - 0,3, - 0,11; $16 > \bar{h} \geqslant 8$: $0,09 \geqslant Sh > 0,02$, - 3,1, - 0,908, - 0,05, - 0,237, - 0,932, - 0,037; $0,24 \geqslant Sh \geqslant 0,09$, - 1,914, - 0,908, - 0,25, - 0,283 - 0,932, - 0,283.

В работе впервые показано влияние наведенной турбулентности (чисел K_B и Sh) на локальный и средний теплообмен в области взаимодействия струи с преградой.

При натекании струи на преграду за счет пульсаций возникает дополнительный перенос тепла и количества движения. Это учитывается введением в уравнения пограничного слоя коэффициента ε_α - дополнительной вязкости, обусловленной наличием турбулентных пульсаций в струе $\varepsilon_\alpha = K \varepsilon_{oy} W_o y$ *). Здесь K - экспериментальная константа, W_o - осредненная скорость набегающего потока, y - расстояние от поверхности преграды, $\varepsilon_{oy} = \sqrt{\overline{\omega'^2_{oy}}} / W_{oy}$ - турбулентность на оси струи в области точки торможения, W_{oy} и $\sqrt{\overline{\omega'^2_{oy}}}$ - местное значение скорости и пульсации. Расчет производится в окрестности критической точки, где предполагается $W_m = a z$. Значение a зависит от скорости истечения W_D, диаметра сопла D, расстояния преграды от среза сопла $\bar{h}$, чисел K_B и Sh и определяется из опыта.

С учетом принятых допущений, система дифференциальных уравнений пограничного слоя имеет следующий вид:

$$f'^2 - (2f + b) f'' = 1 + (1 + b z) f''';$$
$$(b z + 1/\rho_2) \theta'' + (2f + b) \theta' = 0 \qquad (8)$$

*) Smith M., Kueth A. Effects of Turbulence on Laminar Skin Friction and Heat Transfer, The Phisics of Fluids, vol. 12, 1966.

с граничными условиями

$$\zeta = 0 \quad , \quad f(0) = f'(0) = \theta(0) = 0 \; ;$$
$$\zeta \to \infty \, , \quad f'(\infty) = \theta(\infty) = 1 \, . \qquad (9)$$

Здесь β - параметр, учитывающий интенсивность турбулентности набегающей струи $\beta = K \varepsilon_{oy} W_o (a\nu)^{-0,5}$.

Численное решение уравнений / 8 / с граничными условиями / 9 / в широком диапазоне изменения параметров, было получено в МВТУ им.Н.Э.Баумана. Обобщение решения по определению коэффициента теплоотдачи в критической точке для условий осесимметричной струи привело к следующему расчетному уравнению при К = = 0,04973:

$$Nu_o = C \frac{Re_D^{0,5}}{A^n \bar{h}^m} \left[1 + C_1 \varepsilon_{oy}^{0,52} Re_D^{0,26} A^{n_1} \bar{h}^{m_1} \overline{W_o}^{0,52} \right] Pr^{0,4} . \qquad (10)$$

Значение W_o - определяется уравнением / I /. Коэффициенты в уравнении для струи с вдувом: при $K_{в.о} \geqslant K_в > 0,2$; $\bar{h} = \bar{h}_н$, C = 0,810, C_I = 0,153, m = -0,0325, m_1 = 0,0169, n = "-"0,044, n_1 = "-"0,0229; $\bar{h}_т > \bar{h} > \bar{h}_н$,- 0,833,- 0,146,- 0,1085,- 0,0564,- "-" 0,0275,-"-"0,0143; $\bar{h} > \bar{h}_т$,- 3,1,- 0,076,- 0,850, - 0,442,- 0,192,- 0,0998. Для струи с механическим турбулизатором: при $\bar{h}_н \geqslant \bar{h} > 1,5$, 0,11 $\geqslant Sh >$ 0,02, C = 0,758, C_I = = 0,158, n = 0, n_1 = 0, m = 0,0325, m_1 = 0,0169, $\overline{W_o}$ = 1; при 0,09 $\geqslant Sh >$ 0,02, 8 $\geqslant \bar{h} > \bar{h}_н$,- 0,722,- 0,162,- 0,0435,- 0,0226,- 0,1085,- 0,0679, 16 $> \bar{h} \geqslant$ 8,- 3,90,- 0,067,- 0,0435,- 0,0226,- 0,920,- 0,4784; при 0,24 $> Sh \geqslant$ 0,09, 8 $\geqslant \bar{h} > \bar{h}_н$,- 0,52,- 0,192,- 0,180,- 0,0936,- 0,1035,- 0,538, 16 $> \bar{h} \geqslant$ 8,- 2,81,- 0,08,- 0,18,- 0,0936,- 0,92,- 0,4784.

Результаты опытных данных по теплообмену в градиентной области течения для веерной струи, обработаны в форме $St_э = f(Re^{**})$ - А и $St_э = f(Re_т^{**})$ - Б и приведены на рис.3. Здесь числа Стантона $St = \alpha / c_p \rho W_m$ и Рейнольдса $Re^{**} = \delta^{**} W_m / \nu$, $Re_т^{**} = \delta_т^{**} W_m / \nu$ расчитываются по параметрам пограничного слоя. Толщина потери импульса определялась впервые из действительного распределения скорости по толщине пограничного слоя как

$$\delta^{**} = \int_0^{\delta} \frac{W}{W_m} \left(1 - \frac{W}{W_m} \right) dy .$$

Результаты опытов апроксимируются следующей зависимостью - III:

$$St_э = 0{,}452\, Re^{**-1}\, Pr^{-0{,}6}. \qquad (II)$$

Толщина потери энергии определяется из действительного распределения коэффициента теплоотдачи по формуле *) :

$$\delta_T^{**} = \frac{\int_0^z q(z)\,dz}{c_p \rho W_m (T_w - T_m)}.$$

Для расчета теплообмена при взаимодействии струй с наведенной турбулентностью и преград в данной работе предложены следующие формулы:

$$St_э = 1{,}615\, Re_T^{**-1}\, Pr^{-0{,}6};\ \bar{h} = \bar{h}_н\ (\bar{V}), \qquad (I2)$$

$$St_э = 3{,}0\, Re_T^{**-1}\, Pr^{-0{,}6};\ \bar{h} > \bar{h}_н\ (\bar{V}) \qquad (I3)$$

$$(Re_T^{**} = 15 \ldots 5\cdot 10^2).$$

На рис.3 для сравнения нанесены 2 расчетные линии *) :

I - соответствует продольному безградиентному обтеканию пластины ламинарным потоком

$$St = 0{,}221\, Re^{**-1}\, Pr^{-2/3}, \qquad (I4)$$

II - соответствует продольному безградиентному обтеканию пластины турбулентным потоком

$$St = 0{,}0126\, Re^{**-0{,}25}\, Pr^{-0{,}75}. \qquad (I5)$$

Уравнения / II,I4,I5/ и эксперимент А получены в предположении, что профиль температуры в пограничном слое представляется той же функцией, что и измеренное распределение скорости. Сравнение А и Б (рис.3) показывает, что при наличии градиента давления турбулентность набегающей струи оказывает большее влияние на профиль температур, что приводит к существенному увеличению теплоотдачи - эксперимент Б.

---

*) Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М., Энергия, 1972.

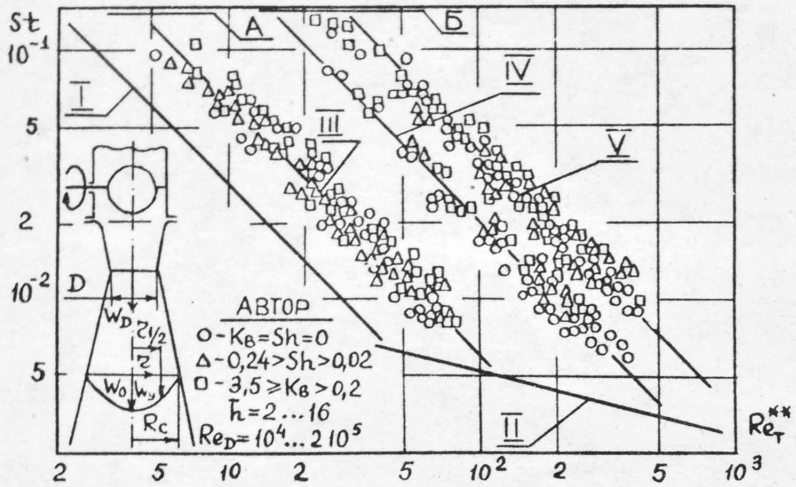


Рис.3. Теплообмен в области взаимодействия турбулентных осесимметричных струй с плоской неограниченной преградой.

В работе установлена связь между параметром вдува $K_в$, числом Струхаля Sh и процессами переноса в пограничном слое на преграде (в окрестности критической точки), которая имеет вид:

$$\frac{(Nu_0/Re_D^{0,5})}{(Nu_0/Re_D^{0,5})_0} = C\,Re_D^{n}\,A^{m}; \quad A = K_в; Sh. \qquad (16)$$

Здесь: $(Nu_0/Re_D^{0,5})$ - значение комплекса для струи с наведенной турбулентностью, $(Nu_0/Re_D^{0,5})_0$ - для струи с естественной турбулентностью. Коэффициенты в уравнении для струи с вдувом при $K_{в.0} \geq K_в > 0{,}2$: $\bar{h} = 2$, $C = 0{,}202$, $m = 0{,}193$, $n = 0{,}188$; $\bar{h} = 3$, - 0,29,- 0,16,- 0,15; $\bar{h} = 4$,- 0,253,- 0,11,- 0,155; $\bar{h} = 8 \ldots$. 16,- 0,79,- "-"0,15,- 0; при $\bar{h} = 5$: $0{,}12 > K_в > 0{,}2$,- 0,217, - 0,07,- 0,16; $K_{в.0} \geq K_в > 0{,}12$,- 0,229,- "-"0,14,- 0,16; $\bar{h} = 6$: $0{,}78 > K_в > 0{,}2$,- 0,257,- 0,03,- 0,135; $K_{в.0} \geq K_в > 0{,}78$,-0,185, - "-"0,14,- 0,163. Для струи с механическим турбулизатором при $0{,}09 \geq Sh > 0{,}02$: $\bar{h} = 2$, $C = 0{,}515$, $n = 0{,}147$, $m = 0{,}229$; $\bar{h} = 3$; - 0,481,- 0,136,- 0,184; $\bar{h} = 4$,- 0,442,- 0,15,- 0,2; $\bar{h} = 5$,- 0,285,- 0,165,- 0,14; $\bar{h} = 6$,- 0,306,- 0,13,- 0,05; $\bar{h} = 8$,-0,41, - 0,072,- "-"0,04; $\bar{h} = 9 \ldots 16$,- 0,785,- 0,2,- "-"0,065; при $0{,}24 > Sh \geq 0{,}09$: $\bar{h} = 2$,- 0,362,- 0,174,- 0,2; $\bar{h} = 3$,-0,295,- 10.

0,I7,- 0,II7; $\bar{h}$ = 4,- 0,232,- 0,I7,- 0,04; $\bar{h}$ = 5,- 0,I9,- 0,I65,- "-"0,027; $\bar{h}$ = 6,- 0,227,- 0,I3,- "-"0,08; $\bar{h}$ = 8,- 0,353,- 0,072,- "-"0,065; $\bar{h}$ = 9 ... I6,- 0,626,- 0,- "-" 0,I6.

Из уравнения / I6 / видно, что параметр $K_в$ и число Sh оказывают существенное влияние на процессы переноса. Если преграда находится в струе на расстоянии от среза сопла $\bar{h} = \bar{h}_н$, увеличение чисел $K_в$ и Sh приводит к увеличению интенсивности теплообмена. При $\bar{h} > \bar{h}_н$ интенсивность теплообмена уменьшается.

Наиболее эффективной областью теплоотдачи является область ускоренного течения. Результаты по среднему теплообмену в данной работе обработаны в форме $\overline{Nu}_* = f(Re_*)$ и апроксимируются следующим выражением:

$$\overline{Nu}_* = c\, Re_*^{n}\, Pr^{0,4}. \qquad (I7)$$

Здесь $\overline{Nu}_* = \frac{\bar{\alpha} D_*}{\lambda}$ - средний безразмерный коэффициент теплоотдачи, $Re_* = \frac{w_0 D_*}{\nu}$ - число Рейнольдса, w_0 - скорость на оси струи, натекающей на преграду / I /, $D_* = 2 r_*$ - диаметр области ускоренного течения / 7 /. Коэффициенты в уравнении: при $\bar{h} = \bar{h}_н$, c = I,64, n = 0,5; при $\bar{h} > \bar{h}_н$, c = I,3, n = 0,55.

2. Экспериментальная установка и обработка опытных данных.

Стенд позволял создавать расчетную воздушную затопленную струю с числами Рейнольдса по параметрам на срезе сопла $Re_D = w_D D/\nu$ = $I0^4$... 2 $I0^5$, веерную, возникающую на преграде, при различных расстояниях преграды от среза сопла $\bar{h}$ = 2 ... I6 и измерять следующие параметры в свободной и веерной струе: скорость, турбулентность, температуру газа и стенки и тепловые потоки в стенку.

Стенд состоит из рабочего участка и системы измерений.

В рабочий участок входят: ресивер со сменными соплами, устройство для вдува газа в корневую часть струи, механический турбулизатор, гидродинамическая и тепловая модели, координатники.

Измерения осредненных скоростей и среднеквадратичных пульсаций в струйных потоках осуществлялись термоанемометром постоянной температуры марки " Disa Elektronik " с линеаризатором. Термоанемометр позволяет измерять осредненные скорости и пульсационные составляющие скорости с высокой точностью.

Расстояние от поверхности гидродинамической модели до нити датчика термоанемометра измерялось оптическим методом с помощью катетометра КМ-6, разрешающая способность которого 0,01 мм.

Температура струи и поверхности тепловой модели измерялась Х-К термопарами. Регистрация показаний осуществлялась с помощью миллиампервольтметра Ф 116/2 и самописца Н 373-2.

Измерения тепловых потоков производились специальным датчиком*), установленным в центре медной плиты тепловой модели. При движении модели относительно струи осуществлялась непрерывная запись величины сигнала пропорциональной тепловому потоку с помощью микроампервольтметра Ф 18 и самописца Н 373-1.

Результаты опытов по гидродинамике и теплообмену обобщались безразмерными параметрами: $K_в$ и Sh.

Входящий в формулы / 1,4,6,7,10,16 / параметр $K_в$, при скорости вдуваемого воздуха $Re_d = \frac{W_d d}{\nu} = 0 \ldots 10^3$, изменялся в пределах $K_в = 0 \ldots 3{,}5$.

$$K_в = \frac{M_к W_d}{M_D W_D} \bar{F} \bar{\ell} = \frac{1}{\bar{\rho} \bar{W} \frac{D^2}{4 D_1 d} \frac{1}{\bar{F} \bar{\ell}}},$$

где M_D, $M_к$ – массовые расходы основной струи и вдуваемого воздуха, W_D, W_d – скорость на срезе сопла и вдуваемого воздуха, $\bar{F} = N\pi d^2/4 \cdot 2\pi R_1 d = N d^2/4 D_1 d = (0 \ldots 1)$ – отношение площадей отверстий вдува и кольцевого отверстия вдува, диаметр D_1, $\bar{\rho} = \rho_D/\rho_d$ – отношение плотностей газов основной струи и малых струй / в данном случае $\bar{\rho} = 1$ /, $\bar{\ell} = \ell/d$, ℓ – расстояние от внутренней поверхности цилиндрического коллектора вдува с диаметром D_1 до поверхности струи, D_1 – диаметр коллектора вдува, равный 40 мм при $D = 20$ мм, $N = 8$ – число малых струй ориентированных нормально к поверхности основной струи, $d = 1$ и 2 мм – диаметр отверстия вдува, $L = 5$ мм, $\bar{W} = W_D^2/W_d^2$.

Число Струхаля $Sh = f D/W_D$ в формулах / 1,6,7,10,16/ изменялось от 0 до 0,24. Здесь $f = 2n$ – частота вращения заслонки, n – число оборотов заслонки. Исследовано влияние размера заслонки на характеристики затопленной струи. Опыты проведены

*) Gardon R. Transducer for the Measurement of Heat-Flow Rate. Journal of Heat Transfer, Trans. ASME, Seriec C, vol.82, 1960. 12.

с тремя заслонками. Площадь перекрытия трубы турбулизатора составляла 29,58 и 87%. Результаты показали, что с увеличением диаметра заслонки происходит более интенсивное затухание скорости на оси струи, что свидетельствует о более эффективном воздействии на характеристики струи заслонки с большим диаметром. Исходя из полученных результатов в дальнейших исследованиях использовалась заслонка с 87% перекрытием.

Опытные исследования проведены на соплах D = 20, 30 и 40 мм. Воздух в рабочий участок стенда подавался через систему управляющих и регулирующих элементов из 16 баллонов высокого давления. Разница температур между изотермической струей воздуха и нагреваемой преградой поддерживалась $\Delta T = 8^0$.

3. Гидродинамика и теплообмен при взаимодействии струи авиационного турбо-реактивного двигателя с преградой.

В настоящее время в технике и технологии находят широкое применение выхлопные струи авиационных двигателей. Высокотемпературная газовая струя, генерируемая ТРД (турбо-реактивными двигателями), используется при очистке самолетов и взлетно-посадочных полос от наледи, железных дорог от снежных заносов, для разогрева остатков груза в думкарах и полувагонах и т.п.

При натекании струи авиационного двигателя на преграду процессы в области взаимодействия осложнены влиянием градиента давления, высокой степени турбулентности, температуры набегающего потока и другими явлениями.

В настоящее время нет методов расчета теплообмена, которые учитывали бы влияние высокой турбулентности и температуры на этот процесс.

В данной работе создана методика расчета теплоотдачи, при составлении которой использовались опытные данные полученные как при исследовании струи авиационного двигателя (ТРД ВК-1а), так и лабораторной струи с наведенной турбулентностью.

Для составления методики расчета теплообмена необходимо знать гидродинамику затопленной струи и потока в градиентной области течения на преграде.

Струя, истекающая из сопла турбо-реактивного двигателя, является неизотермической. Начальная скорость потока и температура зависят от числа оборотов турбины и имеют для ТРД ВК-1а следую-

щие значения: n = 5000 ... 9000 об/мин, Re_D =(I,3 ... 2,65) $I0^6$, T = 680 ... 706 К.Расстояние преграды от среза сопла (насадка D = 0,6 м,установленного на выходе двигателя) составляло I ... I0 м.

Распределение скорости и температуры вдоль оси затопленной струи ТРД в диапазоне обследованных параметров удовлетворительно описывается выражением / I / при Sh = 0,24.Скорость на внешней границе пристенного пограничного слоя в области растекания от критической точки практически изменяется как и для лабораторной струи при Sh = 0,24 / 2,3 / в пределах по $\bar{h}$ ± 6%.

Для расчета теплоотдачи в критической точке при натекании струи ТРД на преграду,получена следующая формула:

$$Nu_0 = C\frac{Re_D^{0,5}}{\bar{h}^n}\left(1 + C_1 Re_D^{0,26}\bar{h}^{-n_1}\right)P_r^{0,4}\left(\frac{T_0}{T_w}\right)^{0,53}, \qquad (I8)$$

которая с введением температурной поправки хорошо согласуется с экспериментом.Коэффициенты в уравнение: при $8 \geq \bar{h} > 3$, C = = 0,96, C_I = 0,2I9, n = 0,34, n_1 = 0,I77; при $\bar{h} > 8$,- 2,4,- 0,I64,- 0,78,- 0,036.

Формула / I8 / получена на основании формулы / I0 / и допущения о том,что турбулентность в струе авиационного двигателя была максимальной и соответствовала числу Sh = 0,24.

Результаты экспериментов для градиентной области веерной струи на преграде были обработанаы в форме $St_э = f(Re_T^{**})$. Апроксимация такой обработки имеет вид:

$$St_э = 45\, Re_T^{**-1} P_r^{-0,6} \quad (Re_T^{**} = 3\cdot10^2 \ldots 10^4). \qquad (I9)$$

Для расчета среднего теплообмена в области наиболее интенсивного теплообмена $(I,5D \geq r > 0)$,предложена в работе формула:

$$\frac{\bar{Nu}}{Re_D^{0,5} P_r^{0,4}} = C\,\bar{h}^{-n}. \qquad (20)$$

При $8 \geq \bar{h} > 3$, C = 6,9I8, n = 0,05; при $\bar{h} > 8$,- I8,6,-0,525.

ВЫВОДЫ

1. Впервые исследовано влияние вдува в корневую часть осесимметричной струи (параметра вдува $K_в$) и механического турбулизатора (числа Струхаля Sh) на параметры струйных потоков, гидродинамику пристенного пограничного слоя и теплообмен в области взаимодействия струи с преградой, в широком диапазоне изменения чисел $Re_D = 10^4 \ldots 2\,10^5$, $K_в = 0 \ldots 3{,}5$, $Sh = 0 \ldots 0{,}24$ и расстояний преграды от среза сопла $\bar{h} = 2 \ldots 16$.
2. При изменении значений параметра вдува $K_в$ (0...3,5) и числа Струхаля Sh (0...0,24) меняются параметры свободной струи: скорость на оси W_o / I / приблизительно на 80%, турбулентность ε_o приблизительно на 100%. При числах $K_в = 2{,}35 \ldots 3{,}5$ и $Sh > 0{,}24$ характеристики струи практически не изменяются.
3. Установлено, что в результате воздействия вдува (параметра вдува) и механического турбулизатора (числа Sh) на пристенный пограничный слой изменяются параметры пограничного слоя на преграде: скорость на внешней границе W_m / 2,3 /, максимальная скорость на внешней границе W_* / 6 /, турбулентность ε, расстояние от критической точки z_* / 7 / (где $W_m = W_*$), профили скорости (рис.2) и турбулентности поперек пограничного слоя. При $K_в = 2{,}35 \ldots 3{,}5$ и $Sh > 0{,}24$ параметры пристенного пограничного слоя изменяются не существенно.
4. Путем создания наведенной турбулентности (чисел $K_в$ и Sh), предложен метод регулирования интенсивности теплообмена в области взаимодействия струи с преградой при $\bar{h} = Const$.
5. Разработана методика расчета гидродинамики и теплообмена при натекании изотермической воздушной струи с естественной и наведенной (вдувом и механическим турбулизатором) турбулентностью на преграду в области ускоренного течения. Получены уравнения для расчета гидродинамических параметров / I - 7 /, локального / I0 - I3, I6 / и средних / I7 / коэффициентов теплоотдачи.
6. Определено, что в диапазоне изменения чисел $Re_D = 10^4 \ldots 2\,10^5$, $K_в = 0 \ldots 3{,}5$, $Sh = 0 \ldots 0{,}24$ и расстояний $\bar{h} = 2 \ldots 16$ интенсивность теплоотдачи в критической точке изменяется в пределах + 200...- 60% / I6 /. За счет влияния турбулентности набегающей струи на профиль температур, теплообмен в градиент

ной области течения превышает приблизительно на порядок (/ I2,I3 /,линии IУ,У,рис.3) соответствующую величину при течении неограниченного потока вдоль пластины с турбулентным пограничным слоем (линия II,рис.3) .

7. На основании метода,развитого в работе,получены формулы для расчета гидродинамики,локального / I8,I9 / и среднего / 20 / теплообмена при натекании высокотемпературной газовой струи турбо-реактивного двигателя ТРД ВК-Iа на преграду.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах.

I. Савин В.К.,Можаева Ж.П.,Аралов А.Д. Гидродинамические исследования пограничного слоя при струйном обтекании пластины."Известия вузов.Сер.Машиностроение",I975,№9,с.76-8I.

2. Аралов А.Д.,Можаева Ж.П. Влияние вдува в корневую часть осесимметричной струи на структуру ее течения."Известия вузов.Сер.Машиностроение",I976,№3,с.75-79.

3. Божко Д.Ф.,Можаева Ж.П.,Аралов А.Д. Исследование физики течения в области взаимодействия осесимметричной турбулентной струи с плоской преградой."Известия вузов.Сер.Машиностроение",I976,№7,с.55-59.

4. Аралов А.Д.,Власов Д.И. Экспериментальное исследование характеристик осесимметричной струи."Известия вузов.Сер.Машиностроение",I976,№I2,с.69-73.

5. Дахно В.Н.,Можаева Ж.П.,Савин В.К.,Аралов А.Д. Влияние турбулентности на теплообмен при взаимодействии плоской струи с преградой."Известия вузов.Сер.Машиностроение",I977,№I, с.I04-I09.

6. Юдаев Б.Н.,Аралов А.Д.,Степанов С.И. Характеристики осесимметричной струи,натекающей на плоскую преграду."Известия вузов.Сер.Машиностроение",I977,№I,с.94-I00.

7. Аралов А.Д. Влияние вдува на гидродинамику пристенного пограничного слоя при струйном обтекании преграды."Известия вузов.Сер.Машиностроение",I977,№I0,с.69-74.

8. Раздел (с.77-82) и приложение (с.229-23I) в книге авторов: Юдаев Б.Н.,Михайлов М.С.,Савин В.К. Теплообмен при взаимодействии струй с преградами.М.,"Машиностроение",I977.