

М 389673

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

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

На правах рукописи

СТЕПАНОВ СЕРГЕЙ ИВАНОВИЧ

ТРЕНИЕ И ТЕПЛООБМЕН ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ
ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУЙ С ПЛОСКОЙ ПРЕГРАДОЙ

Специальность 01.04.14 - Теплофизика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

МОСКВА - 1982 г.

Работа выполняется в МВТУ им. Н.Э.Баумана

Научный руководитель д.т.н. проф. Юдаев Б.Н.

Официальные оппоненты:

д.т.н. проф. Солонин В.И.

к.т.н. Абросимов А.И.

Ведущая организация указана в решении
специализированного совета.

Защита состоится "31" мая 1982 г. на заседании
специализированного совета К.053.15.08 "Энергетические
установки" при Московском высшем техническом училище
им. Н.Э.Баумана по адресу: г. Москва, Лефортовская
набережная, д.1, фак. "Энергомашиностроение"

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ
им. Н.Э.Баумана

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных
печатью, просьба направлять в адрес совета:

Москва 103005

Н

А

с

В Б.Г.

М.389673

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В современной технике: энергетике, металлургии, на транспорте – широко применяются теплообменные устройства, в которых подвод теплоносителя к рабочей поверхности осуществляется с помощью систем параллельных струй или одиночных струй, направленных по нормали или под углом к стенке. Такие устройства используются для охлаждения теплонапряженных элементов конструкций, например анодов мощных тиристоров, термообработки изделий, очистки ото льда и снега дорог, объектов техники, сушки и т.д.

Эффективность устройств данного типа в значительной степени связана с влиянием на теплообмен струйной турбулентности. Локальные коэффициенты теплоотдачи в области, где натекающая струя разворачивается у преграды, при высокой степени турбулентности набегающего потока могут более чем на порядок превышать величины, получаемые при тех же условиях на продольно обтекаемой поверхности или в области удара о преграду ламинарной струи.

Расчеты теплообмена при взаимодействии струй с преградами должны проводиться с учетом влияния струйной турбулентности. Существующие методы имеют частный характер. При обобщении опытных данных не учитывается зависимость характеристик натекающей струи от типа соплового устройства и режима истечения. Недостаточно изучена структура турбулентности внешнего течения. Отсутствуют измерения напряжений поверхностного трения, необходимые для оценки влияния внешней турбулентности на перенос импульса и разработки моделей замыкания уравнений турбулентного движения в пристенном пограничном слое. Не выяснен до конца механизм интенсификации теплообмена на поверхности преграды с ростом турбулентности натекающей струи.

Проведение исследований, связанных с разработкой более общих методов расчета теплообмена при взаимодействии турбулентных струй с преградами, представляет практический интерес, так как их создание позволит сократить объем опытно-конструкторских работ и затраты на проектирование новой техники.

Целью настоящей работы является численное и экспериментальное исследование гидродинамики турбулентного течения, трения и теплообмена в области взаимодействия начального участка плоской



и осесимметричной затопленных турбулентных воздушных струй с низкой начальной турбулентностью с плоской гладкой расположенной по нормали к оси преградой; сравнение расчетных данных с результатами измерений в идентичных условиях; анализ закономерностей течения; оценка влияния осредненных и пульсационных характеристик натекающей струи на процессы переноса импульса и тепла у стенки; разработка методики расчета трения и теплообмена на поверхности преграды.

Научная новизна. Для рассмотренного в работе случая взаимодействия струи с преградой впервые:

1. Получено численное решение осредненных по времени уравнений Навье-Стокса и энергии для несжимаемого турбулентного течения в области взаимодействия плоской и осесимметричной струи с безвихревым малотурбулентным ядром с безграничной равномерно нагретой преградой. Замыкание уравнений осуществлено с помощью эффективных коэффициентов переноса импульса и тепла, турбулентной вязкости, уравнения баланса пульсационной энергии и эмпирических соотношений для масштабов длин.

2. Выполнены измерения пульсаций давления и напряжений трения на преграде, расположенной в начальном участке затопленной воздушной струи с низкой начальной турбулентностью.

3. В турбулентном потоке вблизи преграды, расположенной в начальном участке осесимметричной струи, обнаружены тороидальные зоны с повышенной энергией турбулентности. Установлена связь координат центров указанных зон с максимумами измеренных распределений среднеквадратичных пульсаций давления на преграде.

4. Опытным путем показана слабая зависимость напряжений трения на поверхности преграды от интенсивности турбулентности натекающей струи.

Практическая ценность работы заключается в разработке методики расчета трения и теплообмена в области взаимодействия затопленных турбулентных струй с плоской гладкой нормально расположенной преградой, которая может быть использована в научно-исследовательских и проектно-конструкторских организациях при разработке теплообменных устройств со струйным подводом теплоносителя.

Результаты работы внедрены на предприятиях отраслевых министерств. Документы, подтверждающие внедрение, прилагаются.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на Все-

союзной школе-семинаре " Газодинамика и теплообмен в энергетических установках. " г. Минск, 1979; на заседании Объединенного научного семинара кафедр термодинамики и теплопередачи МВТУ, МТИ, МБИ, МЭИ и МХМ г. Москва, 1980; на Всесоюзной научно-технической конференции " Научно-технический прогресс в машиностроении и приборостроении " г. Москва, 1980; на Семинаре по проблемам турбулентности струйных течений под руководством Г.Н.Абрамовича г. Москва, 1980; на 6-й Всесоюзной конференции по тепломассообмену г. Минск, 1980.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения и приложения, изложенных на 173 страницах; содержит 101 страницу основного текста, 59 рисунков на 42 страницах, библиографию из III названий на 12 страницах, приложение на 17 страницах.

11. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе дан критический анализ опубликованных работ по гидродинамике и теплообмену в области взаимодействия затопленных турбулентных струй с плоской преградой; рассмотрены основные результаты эксперимента, теоретических исследований, известные методы расчета трения и теплообмена на поверхности преграды.

Течение в целом рассматривалось в двух характерных областях: внешнем течении и пристенном пограничном слое. Внешнее течение, где происходит разворот основной массы натекающей жидкости, по оценкам Sparrow, Lee и др. уже при числах Рейнольдса порядка 200 можно рассматривать как невязкое. Расчеты внешнего течения в невязком приближении (Лесин, Rubel, Parameswaoren и др.) дают удовлетворительно совпадающие с опытом распределения скорости на оси и давления на преграде.

Пульсационные характеристики внешнего течения достаточно полно изучены только в случае натекания плоских струй с развитым турбулентным профилем скорости (Wolfshtein, Russel, Gutmark и др.). Теоретическое решение задачи численным интегрированием уравнений Рейнольдса, замкнутых с помощью однопараметрической модели турбулентности Колмогорова-Прандтля, впервые получено в работе *.

Структура турбулентности внешнего осесимметричного течения (Белов с соавторами, Donaldson и др.) и плоского для струй

с потенциальным ядром изучена слабо. Численно задача не решалась.

В исследованиях пристенного пограничного слоя (Белов с соавторами, Юдаев с соавторами и др.) наилучшие результаты дает феноменологическая теория Смита-Куэтта. Однако, применение полученных расчетных формул затруднено тем, что отсутствуют достаточно универсальные зависимости, описывающие связь пульсационных параметров потока на внешней границе пристенного пограничного слоя и в натекающей струе перед началом ее торможения у преграды.

Результаты проведенных измерений локальных тепловых потоков в области взаимодействия турбулентных струй с плоской преградой (Белов, Юдаев с соавторами, Gardon, Donaldson, Hoogendoorn и др.) свидетельствуют, что при больших числах Рейнольдса $Re_0 = 10^5$ и высокой интенсивности турбулентности на оси натекающей струи $\epsilon_{0m} = 20 + 30\%$ они достигают значений, более чем на порядок превышающих величины, полученные из расчета двумерного ламинарного течения. Таким образом, вклад турбулентности в суммарные тепловые потоки на стенке в данных условиях велик и его учет необходим в технических расчетах.

Модели турбулентного переноса тепла в окрестности передней критической точки (Kestlin, Wood, Smith, Saden и др.) предсказывают более слабое влияние турбулентности натекающей струи на трение по сравнению с теплообменом на поверхности преграды. Известные результаты измерений поверхностного трения в области взаимодействия затопленных турбулентных струй с плоской преградой немногочисленны (Beines, Bradshaw, Schauer), выполнены в ограниченном диапазоне параметров натекающей струи, в связи с чем достаточно обоснованные экспериментальные оценки влияния турбулентности на трение в настоящее время отсутствуют. Опытные данные по трению представляют значительный интерес для проверки расчетных моделей течения вблизи стенок.

Известные методы расчета теплообмена в области взаимодействия турбулентных струй с плоской преградой имеют частный характер. Область применения эмпирических формул (Тимофеев, Gardon, Hoogendoorn и др.) ограничена исследованным диапазоном

* Wolfshtein M. Convection Processes in Turbulent Impinging Jets- London: Imp. Coll. Mech. Eng. Dept., 1967, Rep. SF/R/2 - 240 p.

параметров. Расчеты пристенного пограничного слоя затруднены в связи с отсутствием достаточно общих методов определения пульсационных параметров потока на его внешней границе. Возможности полуэмпирических методов расчета пространственного турбулентного течения от небегущего потока до стенки (Wolfshtein, Bower и др.) изучены недостаточно.

На основе проведенного анализа опубликованных работ сформулированы задачи настоящего исследования.

Во второй главе изложен примененный в работе метод численного исследования течения и переноса тепла в области взаимодействия затопленных турбулентных струй с плоской гладкой нормально расположенной преградой. Задача решается численным интегрированием двумерных осредненных по времени уравнений Навье-Стокса и энергии. Дается краткий вывод дифференциальных и конечно-разностных уравнений. Приводятся граничные условия и замыкающие соотношения.

Уравнения неразрывности, движения и энергии записываются в прямоугольной ($n=0$) и цилиндрической ($n=1$) системах координат для безразмерных переменных: $\bar{\psi} = \psi / D v_0$, ($\bar{\psi} = \psi / D^2 v_0$, $n=1$) — функция тока; $\bar{\omega} / r = \omega / r v_0$ — завихренность; $\bar{T} = (T - T_m) / (T_w - T_m)$ — температура. Здесь D — ширина (диаметр) сопла, v_0 — скорость истечения, r — радиус; T_m и T_w — температуры на оси натекающей струи и поверхности преграды.

Система уравнений переноса $\bar{\psi}$, $\bar{\omega}$, $\bar{T}$ замыкается введением коэффициента турбулентной вязкости ν_t . Для его вычисления используется формула Колмогорова-Прандтля

$$1/Re_t = c_1 \sqrt{\bar{\epsilon}} L, \quad (1)$$

где $Re_t = v_0 D / \nu_t$, c_1 — эмпирическая постоянная. Локальные величины энергии турбулентности $\bar{\epsilon} = \epsilon / v_0^3$ находятся из решения уравнения баланса пульсационной энергии. Масштаб длины $L = L_0 / D$ задается с помощью эмпирических соотношений. Дифференциальные уравнения для $\bar{\psi}$, $\bar{\omega}$, $\bar{T}$, $\bar{\epsilon}$ приводятся к каноническому виду, удобному для их численного интегрирования

$$a_1 \left[\frac{\partial}{\partial y} (\varphi \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial x} (\varphi \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial y}) \right] - \frac{\partial}{\partial y} [b_1 \bar{r} \frac{\partial (c_1 \varphi)}{\partial y}] - \frac{\partial}{\partial x} [b_1 \bar{r} \frac{\partial (c_1 \varphi)}{\partial x}] + \bar{r} d_1 = 0 \quad (2)$$

коэффициенты уравнения (2) приведены в таблице

уравне- ние коэф- фициент	завихрен- ности	функции тока	энергии	энергии турбулентности
ψ	$\bar{\omega}/\bar{r}$	$\bar{\psi}$	$\bar{T}$	$\bar{e}$
a_ψ	$\bar{r}^2$	0	1	1
b_ψ	$\bar{r}^2$	$1/\bar{r}^2$	$\frac{1}{Re_0 Pr} + \frac{1}{Re_t Pr_t}$	$\frac{1}{Re_0} + \frac{1}{Re_t Sc_t}$
c_ψ	$1/Re_0 + 1/Re_t$	1	1	1
d_ψ	0	$-\bar{\omega}/\bar{r}$	0	$Se = \frac{1}{2n} [2(\frac{\partial \bar{\psi}}{\partial \bar{r}})^2 + 2(\frac{\partial \bar{\psi}}{\partial \bar{x}})^2 + 2n(\frac{\partial \bar{\psi}}{\partial \bar{x}})^2 + (\frac{\partial \bar{\psi}}{\partial \bar{r}} + \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial \bar{x}})^2] - c_2 \frac{\bar{e}}{L_*}$

Здесь $\bar{x} = x/D$, $\bar{y} = y/D$ - координаты; $\bar{r} = \bar{r}(n+1)$, $\bar{r} = 1(n=0)$ - радиус, $\bar{u} = u/D$, $\bar{v} = v/D$ - компоненты скорости в направлениях $\bar{x}$, $\bar{y}$; $L_* = L/D$ - масштаб длины диссипации; c_2 - эмпирическая постоянная; $Re_0 = \frac{v_0 D}{\nu}$ - число Рейнольдса; Pr , Pr_t , Sc_t - молекулярное и турбулентные числа Прандтля и Шмидта.

При выводе конечно-разностных уравнений производные от функции тока в конвективных членах уравнения 2-аппроксимируются с помощью направленных разностей первого порядка точности. Отмечается, что такой способ аппроксимации производных в расчетах на грубых сетках при больших числах Рейнольдса может привести к искажению истинной картины течения вследствие появления фиктивной вязкости.

Условия на входной границе прямоугольной области ABCD поставлены для случая, когда натекающая струя имеет безвихревое ($\bar{\omega} = 0$) малотурбулентное ($\bar{e} = 0$) ядро. При этом используются опытные данные для свободной струи. Указывается, что отдельные ее характеристики, например, длина безвихревого ядра, зависящие от типа соплового устройства и режима истечения, должны уточняться в каждом конкретном случае расчета. На стенке ставятся условия непроницаемости и прилипания.

Замыкающие соотношения для масштабов длин задаются априори. Вблизи стенки используются формулы *:

$$\bar{L} = \bar{y} [1 - \exp(-c_3 R)] \quad (3)$$

$$\bar{L}_* = \bar{y} [1 - \exp(-c_4 R)] \quad (4)$$

где $R = \sqrt{\bar{e}} \bar{y} Re_0$. Вдали от стенки величины $\bar{L}$ и $\bar{L}_*$ принимаются постоянными в пределах области интегрирования, изменяющимися

пропорционально расстоянию от среза сопла $\bar{h} = \eta/2$, как поперечный интегральный масштаб турбулентности в слое смешения натекающей струи

$$\bar{L} = \bar{L}_* = 0,036\bar{h} \quad (5)$$

Эмпирические постоянные: $C_1 = 0,22$, $C_2 = 0,416$, $C_3 = 0,016$, $C_4 = 0,263$ — выбраны на основе экспериментальных данных для свободных струй и имеющегося опыта расчета турбулентного течения в области взаимодействия струи с преградой.

В заключение главы делается вывод о необходимости тщательной проверки результатов численного решения в связи с недостаточно строгой математической и физической постановкой задачи.

В третьей главе дается описание экспериментального стенда, моделей, измерительной аппаратуры и методик измерений, применявшихся в проведенном исследовании натекания плоской и осесимметричной затопленных турбулентных воздушных струй с низкой $\epsilon_0 = 1+3\%$ начальной турбулентностью и числами Рейнольдса среза $Re_0 = 1,2 \cdot 10^4 \div 1,2 \cdot 10^5$ на плоскую гладкую преграду, расположенную нормально к оси на расстояниях $\bar{h} = 2 \div 10$ калибров от среза сопла. Представлены результаты измерений скорости и интенсивности турбулентности в потоке на оси и в поперечных сечениях области взаимодействия струи с преградой, распределений статического давления, среднеквадратичных пульсаций давления, напряжений трения и локальных коэффициентов теплоотдачи на поверхности преграды.

Для измерения скорости воздушного потока применялся термоанемометр "Disa". Калибровка однониточного несадка проводилась в потоке на срезе сопла. Предельные относительные погрешности измерений осредненной скорости и ее среднеквадратичных пульсаций составляли соответственно $\pm 6,9\%$ и $\pm 7,9\%$.

Пульсации давления на поверхности преграды измерялись пьезоэлектрическим датчиком. Измерительный тракт, кроме датчика, включал предусилитель с высоким входным сопротивлением, анализатор спектра и самописец уровня. Основная погрешность измерения уровня среднеквадратичных пульсаций давления на преграде составляла ± 3 дБ. Представлены распределения среднеквадратичных пульсаций давления на поверхности и их спектральные характеристики.

Напряжения трения на стенке определялись с помощью козырь-

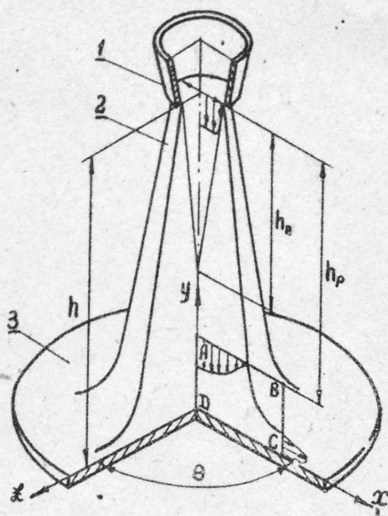


Рис. 1. Расчетная схема.

1 - сопло; 2 - затопленная струя; 3 - преграда;

x, y, z - прямоугольная система координат; r, y, θ - цилиндрическая система координат; ABCD - расчетная область.

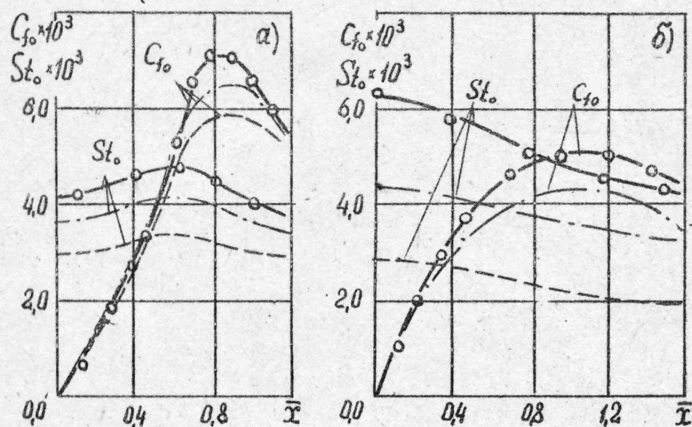


Рис. 2. Распределения локальных коэффициентов трения и теплоотдачи на поверхности преграды.

а - $h=2$; б - $h=8$; — эксперимент; --- численное решение; - - - расчет ламинарного пограничного слоя; $Re_0=90000$; осесимметричная струя.

ка Стантона. Динамическое давление, создаваемое срезаемой частью пристенного пограничного слоя, измерялось жидкостным дифманометром. Напряжения поверхностного трения рассчитывались по калибровочной зависимости

$$y_n = -0,23 + 0,618x_n + 0,0165x_n^2, \quad (6)$$

где $y_n = \lg(\tau_w n^2 / \rho v^2)$, $x_n = \lg(\Delta p n^2 / \rho v^2)$, τ_w — напряжения трения на стенке, n — высота козырька, Δp — динамическое давление,

ρ — плотность, ν — коэффициент кинематической вязкости.

Проведено сравнение результатов косвенных измерений τ_w с помощью козырька и прямых измерений методом подвижной стенки. Совпадение данных было удовлетворительным. Наибольшая относительная погрешность измерений напряжений трения косвенным методом составляла $\pm 10,8\%$.

Теплообмен на преграде исследован при постоянной температуре стенки и температуре струи, равной температуре окружающей среды. Неравномерность распределений температуры поверхности преграды в опытах не превышала $\pm 10\%$. Локальные коэффициенты теплоотдачи на стенке измерялись датчиками Гордона с погрешностью $\pm 18\%$.

Анализ результатов измерений показал, что сложный характер распределений локальных коэффициентов теплоотдачи, трения и пульсаций давления на поверхности преграды, расположенной в начальном участке осесимметричной струи (рис. 2, 4), не может быть однозначно объяснен на основании известных и полученных в работе опытных данных.

В четвертой главе представлены результаты численного и экспериментального исследования течения и теплообмена в области взаимодействия затопленных турбулентных струй с потенциальным ядром с плоской гладкой нормально расположенной преградой.

Численное интегрирование системы уравнений I — V проводилось непосредственно до стенки. Локальные коэффициенты трения и теплоотдачи вычислялись по формулам

$$C_{f0} = 2\tau_w / \rho v_0^2 = 2 / Re_0 \frac{\Delta \bar{u}}{\Delta \bar{y}}, \quad (7)$$

$$St_0 = \frac{\alpha}{\rho c_p v_0} = \frac{1}{Re_0 Pr} \frac{\Delta \bar{T}}{\Delta \bar{y}}, \quad (8)$$

где $\Delta \bar{u}$ — безразмерное расстояние от стенки до ближайшей к ней линии сетки; $\Delta \bar{u}$, $\Delta \bar{T}$ — соответствующие приращения безразмер-

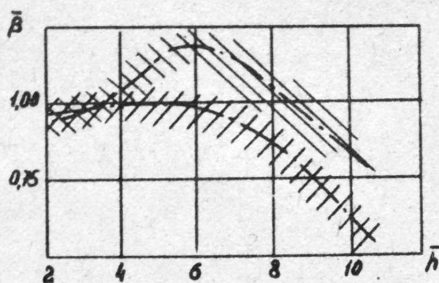
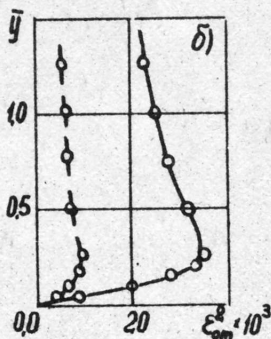
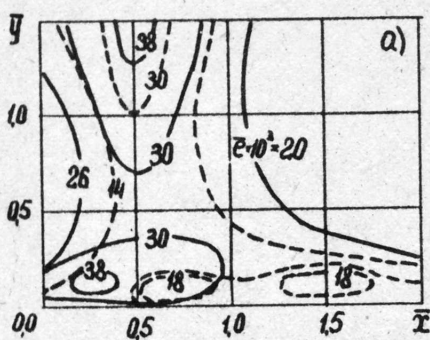


Рис. 3. Градиент скорости в окрестности точки полного торможения струи
1 - осесимметричная струя; 2 - плоская струя; --- численное решение; $\times \times \times$ эксперимент.



$20 \lg(2\sqrt{\bar{p}}/\rho v_0^2)$

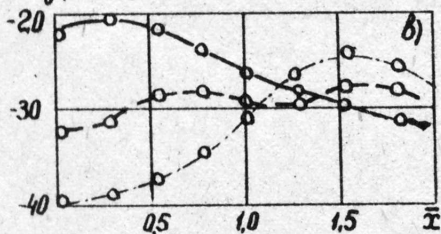


Рис. 4. Пульсационные характеристики потока в области взаимодействия струи с преградой
а - расчетные линии $\bar{v} \cdot 10^{-2}$
б, в - экспериментальные распределения среднеекватранных пульсаций скорости на оси и давления на стенке; --- $\bar{h}=2$; — $\bar{h}=4$; — $\bar{h}=8$;
 $Re_0=48000$; осесимметричная струя.

ных величин скорости и температуры.

В специальной серии методических расчетов выбраны оптимальные параметры сетки; подобраны "новые" значения эмпирических постоянных для пристенной области $C_3=0,009$, $C_4=0,1$, дающие наилучшее в рамках принятой модели турбулентного течения совпадение с опытными данными по теплообмену и трению на поверхности преграды.

Анализ расчетных и экспериментальных характеристик внешнего течения и пристенного пограничного слоя показал, что внешнее осредненное течение можно рассматривать как невязкое. Осесимметричное течение в окрестности точки полного торможения в большей степени, чем плоское, зависит от распределения завихренности в натекающей струе. В частности, уменьшение ширины безвихревого ядра осесимметричной струи с увеличением расстояния от среза сопла до преграды от 2 до 6 калибров (длина ядра свободной струи 5 калибров) приводит к заметному росту градиента скорости в окрестности точки полного торможения $\beta = \frac{\Delta V}{V_0}$. Величина β для плоской струи в аналогичных условиях практически не изменяется (рис. 3).

При изучении расчетных характеристик внешнего пульсационного течения у преграды, расположенной в начальном участке осесимметричной струи, обнаружены тороидальные зоны с повышенной энергией турбулентности. Рассмотрена динамика перемещения зон с изменением расстояния от среза сопла $\bar{h}$. Показано, что координаты центров расчетных зон удовлетворительно совпадают с максимумами экспериментальных распределений среднеквадратичных пульсаций скорости на оси и давления на стенке (рис. 4). Кроме того, получено удовлетворительное совпадение соотношений максимальных величин $\bar{e}$, ϵ_{0m} и $\sqrt{p^*}/\rho V_0$ при различных значениях расстояния $\bar{h}$. В плоском потоке указанные зоны не обнаружены.

Согласно полученным расчетным данным характер течения в пристенном пограничном слое в области взаимодействия струи с преградой в исследованном диапазоне чисел Рейнольдса $Re_0 = 1,2 \cdot 10^4 \div 1,2 \cdot 10^5$ остается близким к ламинарному, несмотря на высокий уровень внешней турбулентности. Профили скорости в пограничном слое в окрестности точки полного торможения близки к известным из автомодельных решений для ламинарного потока. Профили энергии турбулентности в области, где внешний поток ускоряется, не имели максимумов у стенки, характерных для турбулен-

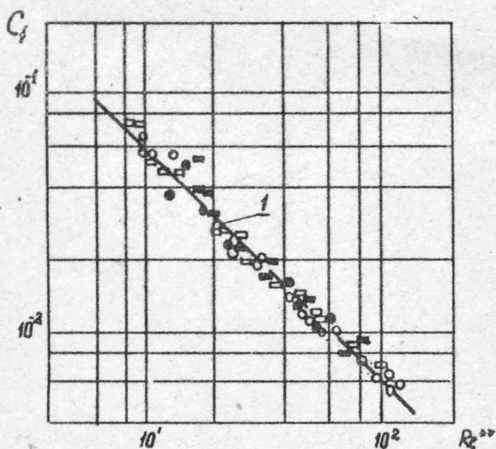


Рис. 5. Трение в пристенном пограничном слое.
 $1 - 0,61/(Re_x)^{-1/2}$; эксперимент: $\square$ - плоская струя, $\bar{h} = 2 \div 4$;
 $\blacksquare$ - плоская струя, $\bar{h} = 8 \div 10$; $\circ$ - осесимметричная струя,
 $\bar{h} = 2 \div 4$; $\bullet$ - осесимметричная струя, $\bar{h} = 8 \div 10$.

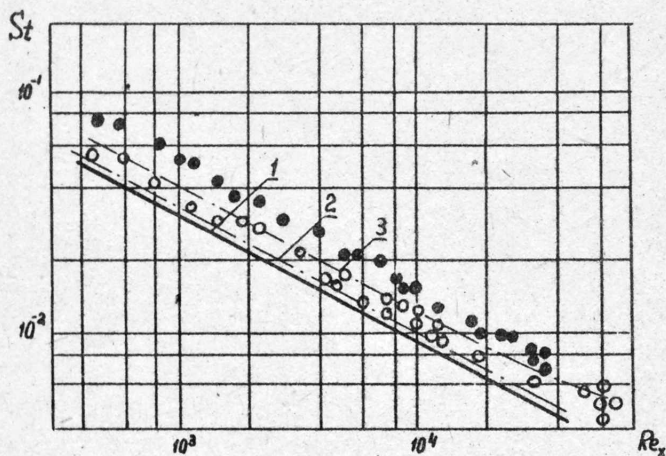


Рис. 6. Теплообмен в пристенном пограничном слое.
 $1 - St = 0,463 Pr^{0.4} / Re_x^{0.45}$ при $Pr = 0,71$; 2,3 - численное решение
 $\bar{h} = 2$ и $\bar{h} = 8$; эксперимент: $\circ$ - $\bar{h} = 2 \div 4$; $\bullet$ - $\bar{h} = 8 \div 10$;
 $Re_0 = 120000$; осесимметричная струя.

тного пограничного слоя. Переход к турбулентному режиму течения в пристенном пограничном слое происходил в начальной части пристенной струи.

При сравнении опытных и расчетных данных по гидродинамике осредненного течения установлено, что наибольшее расхождение величин скорости не превышает $\pm 20\%$.

Сравнение распределений локальных коэффициентов трения $C_f(\bar{x})$ и теплоотдачи $St_0(\bar{x})$ на поверхности преграды показало, что величины St_0 , найденные численным методом, ниже экспериментальных на 20–40%. При этом большая ошибка соответствует более высокой интенсивности турбулентности на оси натекающей струи, изменявшейся от 1% до 17%. Опытные и расчетные величины коэффициентов трения C_f совпадали в пределах погрешностей счета и эксперимента.

Для оценки влияния внешней турбулентности на перенос импульса и тепла в пристенном пограничном слое проведено сравнение экспериментальных данных по трению и теплообмену на преграде с расчетом пограничного слоя в ламинарном приближении. В расчетах использовались измеренные распределения давления на преграде. Установлено, что при высокой интенсивности турбулентности потока на оси натекающей струи $\epsilon_{\text{эм}} = 15 \pm 17\%$ расхождение опытных данных по теплообмену на стенке с ламинарной теорией в исследованном диапазоне чисел Рейнольдса $Re_x = 1,2 \cdot 10^4 \div 1,2 \cdot 10^5$ составляет 80–100% (рис. 26). При этом заметного влияния турбулентности на поверхностное трение не выявлено.

С целью обобщения результатов проведенного исследования трения и теплообмена в области взаимодействия затопленных турбулентных струй с плоской гладкой нормально расположенной преградой проведена обработка опытных и расчетных данных в виде зависимостей коэффициентов трения $C_f = 2\tau_w / \rho u_m^2$ и теплоотдачи $St = \alpha / \rho C_p u_m$ от чисел Рейнольдса $Re_x = \frac{u_m x}{\nu}$, $Re^* = \frac{u_m \delta^*}{\nu}$, $Re_t = \frac{u_m \delta_t^*}{\nu}$, построенных по параметрам пристенного пограничного слоя: u_m – скорости осредненного течения на внешней границе слоя, δ^* – толщине потери импульса, δ_t^* – толщине потери энергии.

Результаты обработки данных по трению во всем исследованном диапазоне чисел Re_x и h удовлетворительно совпали с известными решениями для ламинарного потока в окрестности критической точки (рис. 5).

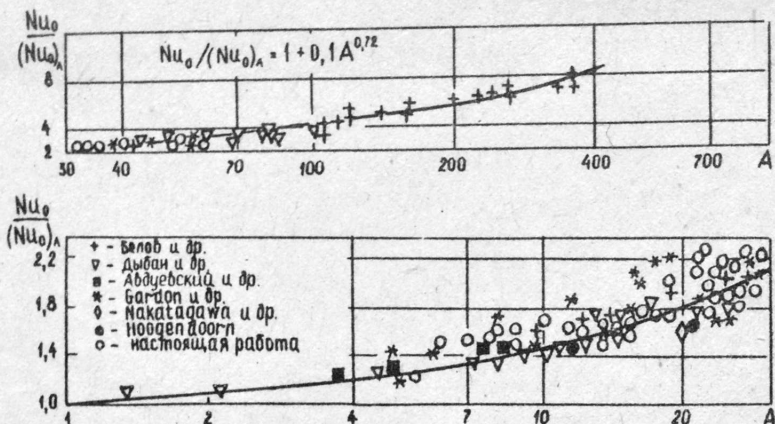


Рис. 7. Теплообмен в окрестности точки полного торможения струи

Полученные зависимости $St(Re_x)$ и $St(Re_t^{**})$ в области $Re_x < 10^5$ и $Re_t^{**} < 2,5 \cdot 10^2$ по характеру также близки к ламинарным $St \sim Re_x^{-0,5}$, $St \sim (Re_t^{**})^{-1}$, но расслаиваются с изменением чисел Рейнольдса и интенсивности турбулентности натекающей струи. Для учета расслоения введен параметр

$$A = \frac{\sqrt{v_m'^2}}{\sqrt{\nu \beta}} = \frac{\tilde{\epsilon}_m \sqrt{Re_0}}{\sqrt{\beta}}. \quad (9)$$

С помощью данного параметра удалось обобщить опытные данные по теплообмену в окрестности точки полного торможения турбулентных струй с плоской нормально расположенной преградой в широком диапазоне чисел Рейнольдса $Re_0 = 3,8 \cdot 10^3 \div 3,6 \cdot 10^6$, размеров сопел $D = 6 \div 600$ мм, расстояний от среза сопла до преграды $\bar{h} = 1,5 \div 40$ и т.д. (рис. 7). Теплообмен вблизи точки полного торможения может быть рассчитан по формуле

$$Nu_0 = (Nu_0)_l (1 + 0,1 A^{0,72}). \quad (10)$$

Здесь $Nu_0 = \alpha D / \lambda$ - число Нуссельта. Величина $(Nu_0)_l$ вычисляется с помощью известных соотношений для ламинарного потока в окрестности критической точки.

В предложенной методике расчета трения и теплообмена на поверхности преграды в области до перехода к турбулентному ре-

жиму течения в пристенном пограничном слое ($Re_\tau < 10^5$) используются все основные результаты проведенного численного и экспериментального исследования внешнего осредненного и пульсационного течения (рис. 3,4) и процессов переноса в пристенном пограничном слое (рис. 5,6,7).

ВЫВОДЫ

1. Проведено экспериментальное и численное исследование течения и теплообмена в области взаимодействия затопленных турбулентных воздушных струй с низкой 1-3% начальной интенсивностью турбулентности с плоской гладкой расположенной по нормали к оси преградой. При числах Рейнольдса $Re_0 = 1,2 \cdot 10^4 - 1,2 \cdot 10^5$ и расстояниях от среза сопла до поверхности 2-10 калибров измерены осредненные и пульсационные характеристики натекающих струй и распределения локальных коэффициентов теплоотдачи на равномерно нагретой преграде. Впервые в указанном диапазоне параметров измерены пульсации давления и напряжения трения на поверхности преграды.

2. Численное решение задачи для плоской и осесимметричной струй с безвихревым малотурбулентным ядром впервые получено интегрированием двумерных осредненных по времени уравнений Навье-Стокса и энергии. Замыкание уравнений осуществлено с помощью эффективных коэффициентов переноса импульса и тепла, турбулентной вязкости, уравнения баланса пульсационной энергии эмпирических соотношений для масштабов длин.

3. При сравнении опытных и расчетных данных установлено удовлетворительное совпадение характеристик осредненного течения, локальных коэффициентов трения и теплоотдачи на поверхности преграды. В турбулентном потоке вблизи преграды, расположенной в начальном участке осесимметричной струи, расчетным путем обнаружены торoidalные зоны с повышенной энергией турбулентности. Получено удовлетворительное совпадение координат центров указанных зон с максимумами измеренных распределений среднеквадратичных пульсаций скорости на оси и давления на стенке.

4. Показано, что рост интенсивности турбулентности на оси натекающей струи на 14-16% в исследованном диапазоне чисел Рейнольдса $Re_0 = 1,2 \cdot 10^4 - 1,2 \cdot 10^5$ приводит к увеличению интенсивности теплообмена в области взаимодействия струи с прегра-

дой на 50-100%, но практически не влияет на изменение напряжений поверхностного трения.

5. Проведено обобщение данных по теплообмену в окрестности точки полного торможения струи на преграде. Предложенная расчетная зависимость подтверждена экспериментально в широком диапазоне чисел Рейнольдса $Re_0 = 3,8 \cdot 10^3 - 3,6 \cdot 10^6$, размеров сопел $D = 6-600$ мм, расстояний от среза сопла до поверхности преграды $h = 1,5-40$.

6. Разработана методика расчета трения и теплообмена в области взаимодействия затопленных турбулентных струй с плоской гладкой нормально расположенной преградой. Методика может быть использована в научно-исследовательских и проектно-конструкторских организациях при разработке теплообменных устройств струйного типа.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Аралов А.Д., Степанов С.И., Юдаев Б.Н. Характеристики осесимметричной струи, натекающей на плоскую преграду - Известия вузов, Машиностроение, 1977, №1, с. 92-99.

2. Степанов С.И. Взаимодействие осесимметричной струи с плоской преградой - Известия вузов, Машиностроение, 1979, №9, с. 52-57.

3. Юдаев Б.Н., Степанов С.И., Гончар Е.И. Исследование взаимодействия дозвуковых осесимметричных турбулентных струй с нормально расположенной плоской преградой - Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции "Научно-технический прогресс в машиностроении и приборостроении" Москва, МВТУ, 1980, с. 43.

4. Аралов А.Д., Степанов С.И., Юдаев Б.Н. Трение и теплообмен при взаимодействии осесимметричной турбулентной струи с нормально расположенной пластиной - Тепломассообмен - 6, Минск, ИТМО, 1980, т.1, ч.2, с.8-12.

5. Аралов А.Д., Степанов С.И., Юдаев Б.Н. Теплоотдача плоской и осесимметричной турбулентных струй, взаимодействующих по нормали с пластиной - Известия вузов. Машиностроение, 1981, №6, с. 70-75.

Типография МВТУ. Зак. 552. Тираж 100 экз.

Л-90843 от 12/IV-82 г. *Одобрено 1.0 п.д.*

