

М417497
МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

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

На правах рукописи

ГРАБАРИК СЕРГЕЙ ЯКОВЛЕВИЧ

УДК 536.24 : 532.517

РАСЧЕТ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕПЛООБМЕНА В РЕЦИРКУЛЯЦИОННОЙ
ЗОНЕ ЗА УСТУПОМ

Специальность 01.04.14 - Теплофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

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

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
ШИШОВ Е.В.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
БРДЛИК П.М.

кандидат технических наук, доцент
КАЛИШЕВСКИЙ Л.Л.

Ведущее предприятие : ИФТБ АН Лит. ССР

Защита диссертации состоится " _____ " _____ 1984г.
на заседании специализированного совета К 053.15.08 "Энерге-
тические установки" при Московском высшем техническом учили-
ще имени Н.Э. Баумана, _____ ча-
бережная, д. I,

Отзыв на _____
чатку, просьба _____
С диссертаци

Авторефер

Ученны
специализир

Подп. к печ.
Л-83065

M417497

100

Актуальность работы. Проблемы защиты энергетических установок от локальных пиков тепловых нагрузок, создание компактных теплообменников, повышение эффективности массообменных устройств приводят к необходимости изучения процессов, интенсифицирующих тепломассообмен. В частности, резкое увеличение коэффициентов теплообмена возникает в местах отрыва потока и образования вихревых зон. Хотя механизм этого явления в определенной степени ясен, расчет локальных чисел St в области рециркуляционного движения в турбулентных потоках сопряжен с большими трудностями.

Объясняется это недостаточностью эмпирической информации о рециркуляционных течениях, что приводит к необходимости моделировать процессы турбулентного переноса на базе известных закономерностей, свойственных тонким сдвиговым слоям типа пограничного слоя. Правомерность такого подхода для двумерных пристеночных течений экспериментально не доказана. Это делает актуальным задачу дальнейшего изучения тонкой структуры турбулентных рециркуляционных течений и влияния ее на тепловые явления.

Цель работы. Экспериментально исследовать структуру турбулентных пульсаций скорости и температуры в рециркуляционном течении за уступом. Определить динамические и тепловые характеристики, необходимые для комплексного сравнения расчета и эксперимента. Разработать расчетную методику, позволяющую с приемлемой точностью находить давление на стенке, локальные коэффициенты трения, теплообмена, профили скорости и температуры. Найти зависимость для коэффициента максимального теплообмена от всех влияющих факторов.

Методы исследования. В работе использовались экспериментальные и теоретические методы исследования.

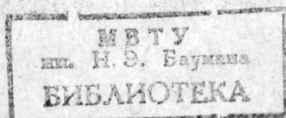
Экспериментальные методы базируются на измерениях средних и пульсационных полей температуры и скорости методом нагретой нити. В последующем из эксперимента получены соответствующие аппроксимации, используемые при расчете. Теоретические методы основаны на анализе приближенных решений уравнений

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1417497

Грабарник С. я. Расчет турб



движения и энергии. Решение пограничного слоя получено модифицированным методом Польгаузена.

Научная новизна. Впервые получены экспериментальные данные по структуре течения в непосредственной близости от стенки. Показано, что обнаруженное ранее нарушение закона "стенки" в рециркуляционном течении за уступом и прямоугольным выступом есть следствие ламинарного характера течения в пристеночной области. Найден относительный закон максимального теплообмена и дополнены физические представления о явлении интенсификации теплообмена в рециркуляционных течениях.

Практическая ценность. Предложенная в работе методика позволяет рассчитывать локальный теплообмен непосредственно за внезапным расширением каналов и труб в виде прямоугольных уступов.

Внедрение работы. Предложенный в диссертации метод используется при расчете теплообмена в реальных конструкциях.

Апробация работы. Основные материалы диссертации докладывались и обсуждались на объединенном московском семинаре "Теплофизика" в 1982 г., на Тринадцатых Гагариновых чтениях в 1983 г. (ИПМ АН СССР, Москва), на 16 конференции молодых исследователей в ИТФ СО АН СССР в 1983 г. (Новосибирск), на Всесоюзной школе-семинаре "Современные проблемы газодинамики и теплообмена и пути повышения эффективности энергетических установок" в 1983 г. (МВТУ, Москва), на научно-техническом семинаре кафедры "Термодинамика и теплопередача" МВТУ им. Н.Э.Баумана.

Публикация работы. Основное содержание диссертации опубликовано в 4 печатных работах и двух научно-технических отчетах МВТУ им. Н.Э.Баумана.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, перечня использованной литературы и приложений. Работа выполнена на 186 страницах: II₄ машинописных страниц текста, 5I страница рисунков и таблиц, II страниц приложений, IO страниц списка литературы, содержащего 99 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, описан объект исследования, дана общая характеристика работы.

Первая глава посвящена анализу работ по рециркуляционным отрывным течениям в каналах, трубах, на пластине с обратным уступом.

Все работы по теплообмену при внезапном расширении каналов и труб следует разделить на две группы по методу исследования. К первой группе относятся экспериментальные работы, в которых сделана попытка получить обобщенное выражение для локального, либо максимального теплообмена. При этом обнаружилось значительные расхождения как по форме обобщения, так и по численным коэффициентам, входящим в аппроксимирующие выражения. Часть авторов экспериментально доказывало, что в турбулентных потоках за точкой отрыва

$$Nu^{\max} \sim Re^{0,8}$$

В других многочисленных экспериментах получено, что

$$Nu^{\max} \sim Re^{0,67}$$

В ряде работ обнаружена зависимость числа Nu не только от числа Рейнольдса, но и от степени расширения потока. В плоских каналах при одинаковых параметрах на входе после расширения наблюдается резкое различие в распределении Nu на противоположных стенках. Это привело к необходимости ввести еще один независимый параметр — длину отрывной зоны. Однако хорошего согласия между различными экспериментами так и не было достигнуто. В целом, расчет по различным формулам максимального теплообмена дает расхождение в 100% и выше.

Вторая группа работ — теоретические исследования, основанные на решении дифференциальных уравнений движения и энергии. Наилучшие результаты достигнуты с использованием $k-\epsilon$ модели турбулентности. В то же время оказались неудачными попытки смоделировать процессы переноса в непосредственной близости от стенки. Поэтому большинство авторов для нахождения трения и теплообмена используют пристеночные функции, в

основе которых лежит логарифмический закон "стенки"

$$u/\sqrt{\tau_w/\rho} = \frac{1}{k} \cdot \ln(E \cdot y \cdot \sqrt{\tau_w/\rho} / \nu),$$

где

$$k = (\tau_w/\rho) \cdot C_{m\infty}^{-1/2}, \quad E = 5,0 \cdot C_{m\infty}^{-1/4}$$

Это означает, что в турбулентном течении, какое бы возмущение оно не претерпевало, предполагается, что вблизи стенки сохраняются закономерности, свойственные обычному пристеночному течению. Однако уже первые измерения в рециркуляционных течениях показали, что закон "стенки" в них существенно нарушается. Никакого объяснения этот факт в литературе не получил.

На основании анализа предыдущих исследований обоснована необходимость изучения тонкой структуры течения вблизи стенки, получения комплексной информации о потоке в целом и влияния тепловых и гидродинамических граничных условий на различные интегральные характеристики рециркуляционного течения.

Во второй главе описывается экспериментальная установка, используемое оборудование и методика эксперимента. Исследования проведены в МВТУ им. Н.Э. Баумана на дозвуковой аэродинамической трубе незамкнутого типа. Рабочая часть трубы имеет размеры 300 x 500 x 3000 мм. Экспериментальный участок представляет собой две передние съемные пластины, установленные друг относительно друга со ступенькой в 30 мм. Пластины изготовлены из стеклопластика и имеют размеры 300 x 500 x 1100 мм. На поверхности, обращенной к потоку, нанесен токопроводящий слой, разделенный на 20 участков с отдельным электродом. Контроль температуры поверхности производился двадцатью хромель-копелевыми термопарами, заделанными в рабочие плиты. Основная измерительная система аэродинамической установки включает в себя четырехканальный комплект аналоговой термоанемометрической аппаратуры типа 55м фирмы "ДИСА". Комплект позволяет измерять средние и пульсационные характеристики скорости и температуры, а также различные корреляционные характеристики. Методика измерений основана на использовании уравнений реакции термоанометра, нить которого расположена в определенном положении относительно стенок

канала, а поток имеет произвольное направление. Вывод уравнений реакции дан применительно к линеаризованному сигналу и двумерному осредненному полю скоростей.

Коэффициенты трения и теплообмена определялись по распределению скорости и температуры в вязком подслое. Учет охлаждающего влияния стенки производился по известной методике экспериментального определения поправки на сигнал датчика при отсутствии воздушного потока. Способ определения поправки разработан на кафедре "Термодинамика и теплопередача" ИВТУ им. Н.Э.Баумана. Используемая методика позволила определить основные характеристики со следующими предельными относительными погрешностями: $\epsilon_u = 4,15 - 9,15\%$, $\epsilon_{u'} = 5,15\%$, $\epsilon_v = 8\%$, $\epsilon_T = 2,5\%$, $\epsilon_{T'} = 3,5\%$, $\epsilon_{t_w} = 29,15\%$, $\epsilon_{q_w} = 27,5\%$, $\epsilon_{u,v'} = 18,2\%$, $\epsilon_{v,T'} = 30,4\%$.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований. Эксперименты проведены в условиях развитого турбулентного течения перед отрывом с числом Рейнольдса

$Re = u_s \delta_s / \nu = 47835$, где индекс s относится к предотрывным параметрам потока. Отношение толщины предотрывного пограничного к высоте ступеньки равнялось $\delta_s / h = 1,5$. В ядре потока с помощью задней гибкой стенки канала устанавливалось безградиентное распределение скорости. Отношение ширины ступеньки к высоте равнялось 16,8, что позволило получить двумерное рециркуляционное течение по крайней мере в центральной части канала.

В опытах измерены средние значения скорости и температуры в пяти сечениях до ступеньки и семи сечениях после ступеньки, включая четыре сечения в рециркуляционной зоне. В этих же сечениях измерены среднеквадратичные значения пульсации температуры и продольной пульсации скорости. В рециркуляционной зоне найдены величины $u, v, \overline{u'^2}, \overline{v'^2}, \overline{w'^2}, \overline{u'v'}, \overline{v'T'}$. Изменение тепловых граничных условий вверх по потоку достигнуто за счет нагрева первоначально участка только за ступенькой, а затем нагрева всего рабочего участка.

На рис. 1 и рис. 2 представлены результаты измерения

динамической и тепловой структуры потока в рециркуляционной зоне. Качественно гидродинамика согласуется с многочисленными экспериментами. Количественные же различия обусловлены неодинаковыми условиями проведения опытов. Заслуживает внимания факт существенного влияния тепловых граничных условий на распределение средней и пульсационной составляющей температуры. В свое время Шланчюскас указывалось, что неучет влияния тепловой предистории есть один из возможных источников ошибок. В то же время следующий график (рис. 3), где представлены распределения C_f , St , $C_p = (P - P_c)/\rho \frac{U^2}{2}$ вдоль стенки канала, показывает, что локальный теплообмен изменился при этом незначительно. Причина состоит в том, что основное термическое сопротивление сосредоточено в пристеночном пограничном слое, развивающегося от точки присоединения. Его же параметры зависят от гидродинамики течения, которая в обоих случаях нагрева одинакова, и распределения температуры на верхней его границе. Последняя характеристика изменяется незначительно, когда тепловой пограничный слой перед отрывом сопоставим с высотой ступеньки.

По результатам измерений вычислены значения вихревой вязкости

$$\nu_t = - \overline{u'v'} / d\bar{u}/dy$$

и длины пути смешения

$$l = \sqrt{|\overline{u'v'}|} / d\bar{u}/dy$$

(рис. 4) в рециркуляционной зоне. Полученные данные показывают, что в центральной части потока между оторвавшимся пограничным слоем и возвратным течением существует сдвиговый слой с приблизительно постоянным значением ν_t и l . При этом обе величины растут вдоль по потоку пропорционально x . В среднем получено, что

$$l = 0,0231 \cdot x$$

Эти данные свидетельствуют о том, что от точки отрыва начинает расти новый сдвиговый слой — плоский слой смешения, вихревая вязкость в котором может существенно отличаться от ν_t оторвавшегося пограничного слоя.

Особого интереса заслуживают данные, полученные в не —

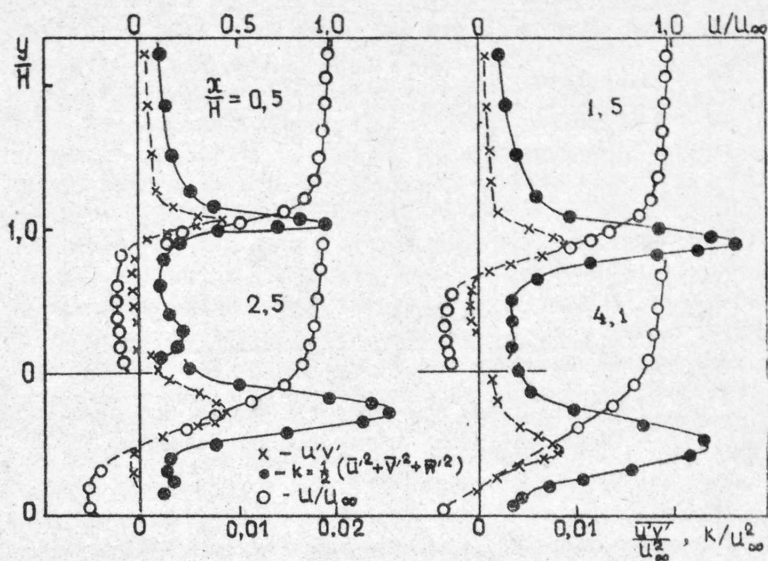


Рис.1. Гидродинамическая структура течения за уступом

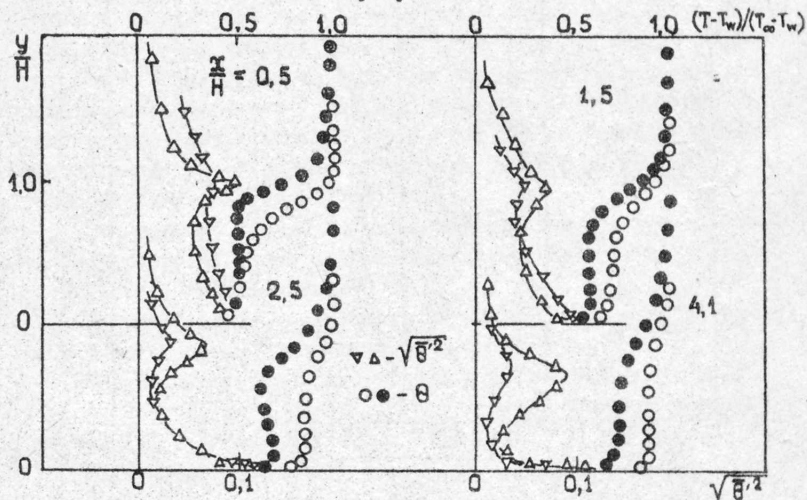


Рис.2. Тепловая структура течения за уступом
 o - нагрев только за уступом
 • - нагрев всего рабочего участка

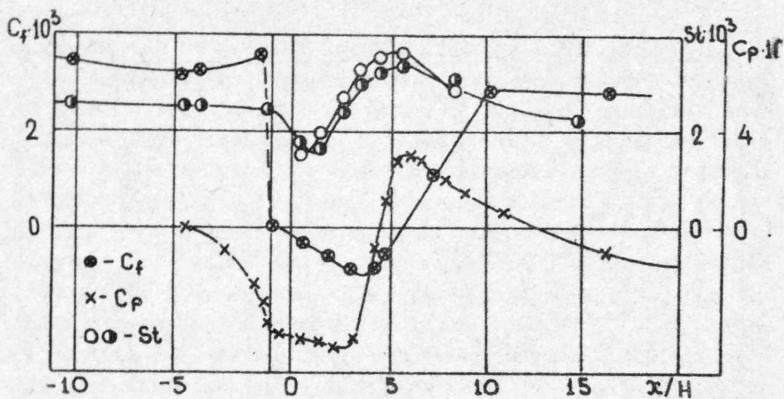


Рис.3. Распределение коэффициентов трения, давления, числа St вдоль стенки канала с обратным уступом

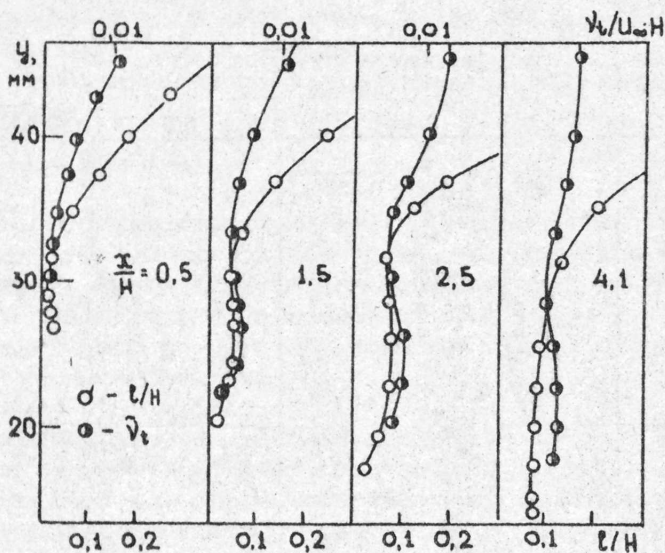


Рис.4. Турбулентная вязкость и длина пути смешения в ближнем следе за уступом

посредственной близости от стенки. На рис.5 приводятся профили скорости и температуры, построенные в переменных законах "стенки". На рис. 6 представлены результаты распределения пульсаций скорости и температуры вблизи стенки.

Как оказалось, отклонение от логарифмического закона "стенки" для скорости и для температуры составило существенную величину. Уровень же продольных пульсаций скорости в отличие от пульсаций температуры выше чем на пластине. Была сделана попытка получить закон трения и теплообмена для пристеночного пограничного слоя, используя данные рис.5. Так как верхняя граница слоя величина неопределенная, то поперек потока взято несколько точек в области предполагаемой верхней границы. Как оказалось, качественно полученные законы приближаются к известным соотношениям ламинарного пограничного слоя на пластине. Кроме того, рейнольдсовы напряжения вблизи стенки близки нулю. Это дало основание считать, что внутренний пограничный в рециркуляционной зоне не турбулентный как предполагается в большинстве работ, а ламинарный. Это объясняет и различия в распределении пульсаций скорости и температуры. Так как турбулентный перенос вблизи стенки отсутствует, то значения пульсаций определяются величиной вносимых во внутренний слой возмущений со стороны внешнего потока и профилем средней скорости и температуры в этой области. В силу существенного различия последних это ведет к соответствующим различиям в распределении пульсаций скорости и температуры. Таким образом, нарушение закона "стенки" объясняется в настоящей работе ламинарным характером течения в непосредственной близости от стенки.

Это дало основание в дальнейшем при расчете всю область течения разбить на две подобласти: ламинарный пограничный слой у стенки и турбулентный след.

В четвертой главе диссертации разработана расчетная схема и выведен закон максимального теплообмена.

Поле скоростей аппроксимировано кубическим сплайном. Новому сдвиговому слою соответствует модифицированный профиль Шлихтинга

$$\frac{u}{u_{\infty}} = \frac{\hat{u}_1 + \hat{u}_2}{2} + \frac{\hat{u}_1 - \hat{u}_2}{2} \cdot f(\eta),$$

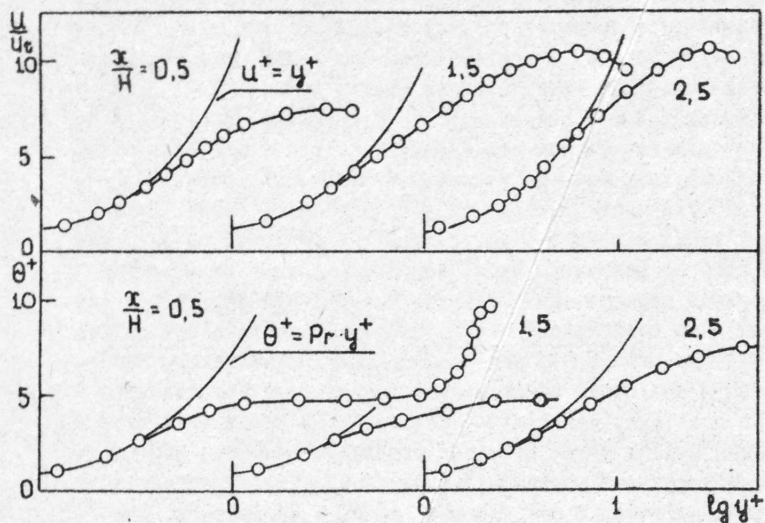


Рис.5. Профили скорости и температуры в координатах закона "стенки" $u^+ = \frac{u}{u_{\tau}}$, $\theta^+ = \frac{\theta \sqrt{c_p/2}}{St} = f\left(\frac{y \cdot u_{\tau}}{\nu}\right)$.

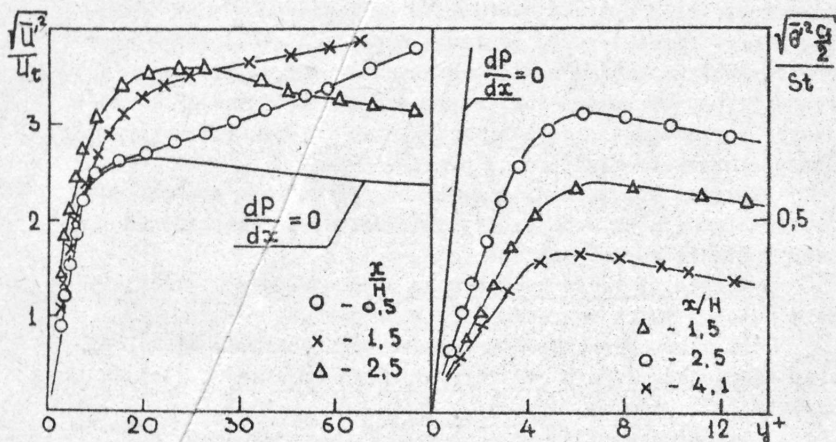


Рис.6. Диссипации скорости и температуры вблизи стенки

где

$$f(\eta) = K(\eta - \eta^3) + \eta^3$$

$\bar{u}_1$ - скорость прямого потока на границе отрезка;

$\bar{u}_2$ - скорость возвратного потока на границе отрезка, в возвратному потоку и оторвавшемуся пограничному слою квадратичные зависимости

$$\frac{u}{u_\infty} = A_0 + A_1 \frac{y}{b_{\text{отсв}}} + A_2 \left(\frac{y}{b_{\text{отсв}}} \right)^2$$

$$\frac{u}{u_\infty} = \bar{u}_1 + E_1 \left(\xi - \frac{1}{2} \xi^2 \right).$$

Коэффициент A_0 аппроксимирован следующим выражением

$$A_0 = -\frac{3}{4} \left[\frac{x}{x_R} - \left(\frac{x}{x_R} \right)^2 \right],$$

где x_R - длина отрывной зоны.

Аппроксимация коэффициента A_2 выполнена так, чтобы удовлетворить распределению давления на стенке

$$A_2/b_{\text{отсв}}^2 = (30 \tilde{x}^2 - 30 \tilde{x}^4)/(\delta_s^2 + 1)$$

В этом случае коэффициент давления на стенке находится по выражению

$$\frac{C_p}{2} = \frac{p - p_s}{\rho u_\infty^2} = -\frac{A_2}{2} + 0,0013 \left(\frac{x}{H} \right)^2 (10 \tilde{x}^3 - 6 \tilde{x}^5)/(\delta_s^2 + 1).$$

Все аппроксимации по X нормированы длиной отрывной зоны.

Выражение для x_R получено из допущения о постоянстве скорости роста сдвигового слоя независимо от предистории потока и учета двумерного характера течения за уступом кривизной верхней границы вязкого потока.

В результате найдено

$$(0,0168 - 0,023 \cdot c)/(\delta_s^2 + 1) \tilde{x}_R^2 + 0,13 \tilde{x}_R - 1 = 0,$$

где $c = 1 - (F_1/F_2)^2$, F_1 и F_2 - площади поперечного сечения канала до и за расширением.

Для отыскания поля температур использованы аппроксимации комплекса $\bar{u}\theta = \frac{u}{u_\infty} \frac{T - T_{wa}}{T_\infty - T_{wa}}$, аналогичные выражениям для $\bar{u}$ на соответствующих отрезках.

На рис.7 показаны результаты расчета профилей скорости и температуры в рециркуляционной зоне.

В целом получено вполне удовлетворительное согласие между расчетом и экспериментом за исключением участка вблизи линии нулевой скорости для профиля температур.

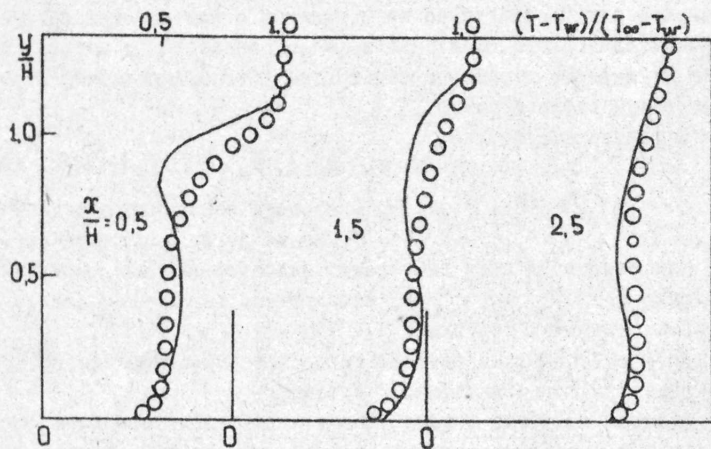
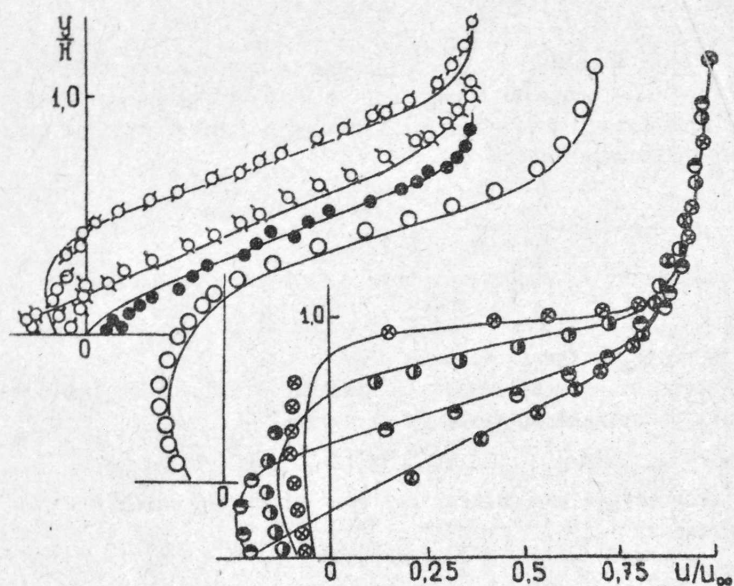


Рис.7. Результаты расчета профилей скорости и температуры

Трение и теплообмен определялись на основе приближенного решения ламинарного пограничного слоя, развивающегося от точки присоединения. Профиль скорости аппроксимировался кубическим полиномом, а профиль температуры полиномом четвертого порядка. Решение найдено с учетом продольного градиента давления и градиента температуры в условиях внутренней задачи, то есть, когда

$$dP/dx \neq \rho u_0 du_0/dx$$

Внешняя турбулентность учтена ненулевым значением $\frac{\partial u}{\partial y}$ на внешней границе ламинарного пограничного слоя при стыковке профилей скорости и температуры следа и пограничного слоя. Интегрирование по продольной координате осуществлялось численно с использованием интегральных уравнений импульса и энергии.

Результаты расчета локальных коэффициентов трения и числа St изображены на рис.8. За исключением небольшого участка вблизи вертикальной стенки уступа расхождение расчета и эксперимента не превышало 30%. Эта величина вполне удовлетворительная, так как точность опытных данных того же порядка.

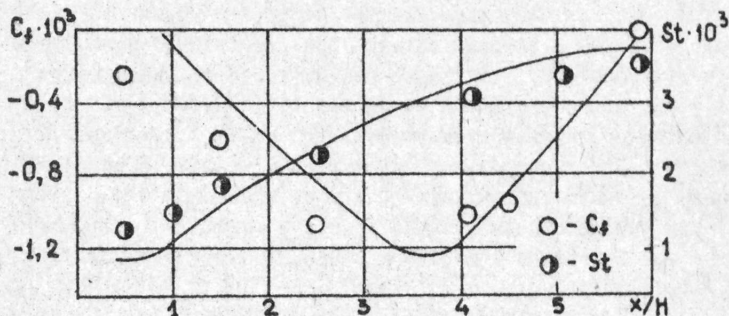


Рис.8. Сравнение результатов расчета C_f и St с экспериментом

На основании приближенного решения дифференциального уравнения ламинарного пограничного слоя найдено выражение для коэффициента теплообмена в точке присоединения

$$St_R = 1,443 \cdot \theta_{0R} \cdot Pr^{-2/3} \cdot Re_H^{-1/2} \cdot \tilde{x}_R^{-1/2}, \quad (I)$$

где

$$\text{Re}_H = u_\infty \cdot H / \nu, \quad \Theta_{0R} = (T_0 - T_{wR}) / (T_\infty - T_{wR})$$

$\tilde{x}_R$ – безразмерная длина отрывной зоны;

T_0 – температура на внешней границе ламинарного пограничного слоя.

При выводе (I) дополнительно использовалось известное решение для расчета начальной толщины пограничного слоя в критической точке. Сравнение проведено по пяти наиболее известным работам с двадцатью различными экспериментами. Число Re_H изменялось от $24,4 \times 10^4$ до $1,02 \times 10^4$, число Pr от 0,7 до 6, степень расширения потока от 1,67 до 4,7. Рассматривались различные геометрии проточных частей: обратный уступ, внезапное расширение плоского канала и внезапное расширение труб. Среднеквадратичная ошибка при сопоставлении с экспериментом составила 26,5%. Это в несколько раз лучше, чем дают известные в настоящее время другие аналогичные соотношения. Кроме того, для упрощения расчетов принято

$$\Theta_{0R} = 0,9$$

Эта величина соответствует случаю нагрева только за ступенькой. При увеличении толщины теплового слоя перед отрывом Θ_{0R} уменьшается. Так при $\delta_{T/H} = 1$, $\Theta_{0R} = 0,78$.

Обращает на себя внимание тот факт, что уравнение (I) хорошо работает в плоских каналах при существенно различной длине отрывных зон. Вид уравнения (I) резко отличается от всех известных аналогичных соотношений. Во-первых, число Nu в точке присоединения пропорционально $\text{Re}_H^{0,5}$. Во-вторых, не стало одного независимого параметра – степени расширения потока. Он оказался связанным с другой величиной – $\tilde{x}_R$.

При выводе относительного закона максимального теплообмена все параметры отнесены к условиям перед отрывом. В результате получено

$$\Phi = \left(\frac{St_{\max}}{St_0} \right)_{\text{Re}_{S_0} = \text{idem}} = 64,15 \frac{\Theta_{0R} Pr^{1/2}}{\text{Re}_H^{1/4}} \cdot \left(\frac{\delta_S}{H} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{u_S}{u_R} \right)_\infty^{1/2} \cdot \tilde{x}_R^{-1/2}, \quad (2)$$

где индекс S относится к параметрам перед отрывом;

индекс R относится к параметрам в точке присоединения.

Полученное уравнение показывает, что при прочих равных условиях относительный теплообмен растет с уменьшением высоты уступа. Однако эксперименты на трубах с внезапным расширением дают прямопротивоположный результат. В диссертации пока-

зано, что это разногласие произошло из-за различий в форме обобщения экспериментов. Анализ предшествующих способов обобщения в относительном виде привел к выводу о нецелесообразности использовать в качестве "стандартных" условия далеко за точкой присоединения.

Выражение (2) позволяет определить способ интенсификации теплообмена с помощью обратных уступов.

При уменьшении высоты уступа, когда $H \rightarrow 0$, одновременно уменьшается величина Θ_{0R} , так как термическое сопротивление отрывного пограничного слоя растет. В результате при $H \rightarrow 0$ интенсификации получить не удастся, если теплообмен происходит до и за ступенькой. Однако, если нагрев осуществляется только за уступом, то $\Theta_{0R} \approx \text{const}$ и, следовательно, теплообмен можно увеличивать многократно. Тот же эффект достигается, если поток имеет $Pr \gg 1$. В этом случае толщина теплового слоя перед уступом во много раз меньше толщины динамического слоя и при увеличении δ_s/H величина Θ_{0R} будет изменяться незначительно.

В приложении помещены тексты программы расчета поля скорости, температуры, давления трения, локального теплообмена в рециркуляционной зоне.

В заключении перечислены основные результаты работы и сделаны следующие выводы:

1. Течение в пограничном слое, развивающегося от точки повторного присоединения в сторону уступа носит ламинарный характер, несмотря на высокую внешнюю турбулентность. Эта особенность является причиной значительного нарушения закона "стенки" в рециркуляционной области течения.

2. В следе за уступом только область течения, расположенная между оторвавшимся пограничным слоем и возвратным потоком, имеет признаки классического пограничного слоя - свободного слоя смешения: постоянство вихревой вязкости и длины пути смешения поперек потока и пропорциональность этих величин ширине слоя.

3. Тепловые граничные условия вверх по потоку оказывают существенное влияние на распределение средних и пульсационных значений температуры в рециркуляционной зоне за уступом.

В то же время локальный теплообмен изменяется незначительно. Причина этого - малое термическое сопротивление вихря и большое термическое сопротивление ламинарного пограничного слоя.

4. Расчет локальных коэффициентов трения и теплообмена дает хорошее согласие с опытом, если предположить, что пограничный слой у стенки ламинарный.

5. Найденное выражение для длины отрывной зоны обобщает большинство экспериментальных данных, если положить, что скорость расширения сдвигового слоя постоянна, а кривизна внешней границы зависит от степени расширения потока и продольного градиента давления.

6. Выведенный относительный закон максимального теплообмена показывает, что он преимущественно зависит от трех параметров: числа Re_n , длины отрывной зоны и степени расширения потока.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Грабарник С.Я., Роганов П.С., Шишов Е.В. Установка для исследования турбулентной структуры и методика измерения ее характеристик в отрывных течениях за уступом. - Научн. труды /Моск. лесотех. ин-т, 1982, № 146, с. 47-53.

2. Грабарник С.Я., Заболоцкий В.П., Роганов П.С. Измерение тепловых и гидродинамических характеристик в рециркуляционном течении за уступом. - Современные проблемы газодинамики и теплообмена и пути повышения эффективности энергетических установок: Тез. докл. 4-й Всесоюзной школы-семинара. - М.: МВТУ, 1983, с. 13.

3. Структура турбулентного течения и теплообмен в ближнем следе за уступом/ С.Я. Грабарник, В.П. Заболоцкий, П.С. Роганов, Е.В. Шишов. - Изв. вузов. Авиационная техника, 1983, № 3, с. 23-27.

4. Грабарник С.Я., Заболоцкий В.П., Роганов П.С. Турбулентный теплообмен и трение в рециркуляционной зоне за уступом. - В кн.: Теплообмен в одно- и двухфазных системах/Под ред. Н.А. Рубцова. - Новосибирск, 1983, с. 10-14.

Грабарник

