

М295366

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Министерство высшего и среднего специального образования СССР
Московское ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н.Э. Баумана

На правах рукописи

АФАНАСЬЕВ
Валерий Никанорович

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОСЪЕМЛЕНИЯ В ЗАТОРМОЖЕННОМ РАВНОВЕСНОМ
ТУРБУЛЕНТНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ В НАЧАЛЬНОМ УЧАСТКЕ ТЕПЛОВОЙ
ЗАВЕСЫ

диссертация написана на русском языке

(Специальность - 05.14.05 - Теоретические основы
теплотехники)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ор.
Министерство высшего и среднего специального образования СССР
Московское ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н.Э. Баумана

На правах рукописи

АФАНАСЬЕВ
Валерий Никанорович

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА В ЗАТОРМОЖЕННОМ РАВНОВЕСНОМ
ТУРБУЛЕНТНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ В НАЧАЛЬНОМ УЧАСТКЕ ТЕПЛОВОЙ
ЗАВЕСЫ

диссертация написана на русском языке

(Специальность - 05.14.05 - Теоретические основы
теплотехники)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

1295366
НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1295366

Афанасьев В.Н. Исследования

Москва

1976

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

Научный руководитель -
кандидат технических наук, доцент Е.В. Шишов.

Официальные оппоненты:

1. Доктор технических наук, В.А. Бородачев,

2. Кандидат технических наук, доцент Л.Л. Калишевский,
(МВТУ)

Ведущее предприятие - институт Механики МГУ им.М.В. Ломоносова.

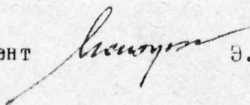
Автореферат разослан " " _____ 1976 г.

Защита диссертации состоится "18" X 1976 г. на заседании специализированного Совета по тепловым машинам и теоретическим основам теплотехники в МВТУ им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5

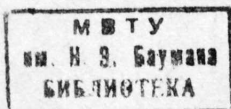
Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по указанному адресу.

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

Ученый секретарь Совета
кандидат технических наук, доцент

 Э.А. Манушин

Л-101365 от 13.7.76 г. Объем I п.л. Тип МВТУ. Зак.1550. Тип 100



А н н о т а ц и я: в работе приведены экспериментальные данные по средним и пульсационным характеристикам теплового пограничного слоя, развивающегося в условиях сильно заторможенного равновесного турбулентного пограничного слоя в области тепловой завесы. Показано, что положительный градиент давления приводит к интенсификации пульсационных характеристик динамического слоя и к более заполненному профилю средних температур поперек слоя. Представлены результаты экспериментального исследования теплообмена в непосредственной окрестности ступенчатого изменения теплового потока на стенке. Получены аналитические зависимости для расчета эффективности тепловой завесы.

А к т у а л ь н о с т ь п р о б л е м ы: продолжающееся развитие современной энергетической техники, возрастающий в последние годы интерес к МГД-генераторам выдвигает на первый план вопросы защиты поверхностей от высокотемпературных потоков газа. Аэродинамическая защита узлов энергетических установок от высокотемпературных сред осуществляется с помощью тепловых завес. В настоящее время наиболее полно исследована эффективность тепловых завес в условиях безградиентного обтекания поверхностей. Однако, перенос этих методов расчета на случаи градиентных течений требует экспериментальной проверки.

Ц е л ь р а б о т ы заключается в экспериментальной проверке влияния положительного градиента давления на процессы теплообмена в условиях ступенчатого изменения теплового потока на стенке и получения экспериментальных данных по эффективности тепловой завесы в диффузорных турбулентных пограничных слоях.

Н а у ч н а я н о в и з н а работы состоит в экспериментально установленном факте влияния положительного градиента давления на профиль средних температур. Изучены средние и пульсационные характеристики теплового слоя в условиях отрицательной тепловой ступеньки, получены экспериментальные данные по эффективности тепловой завесы в условиях диффузорного турбулентного пограничного слоя — положительный градиент давления ухудшает эффективность тепловой завесы.

Практическая ценность работы заключается в том, что результаты проведенных исследований могут быть использованы при расчете систем охлаждения МГД-генераторов, диффузоров энергетических установок, охлаждения лопаток высокотемпературных турбин и т.д.

В связи с возрастающим интересом в последние годы к МГД-генераторам и строительством других теплонапряженных энергетических устройств особенно актуальным становится проблема защиты поверхностей от воздействия высокотемпературных сред.

Аэродинамическая защита от высокотемпературных газовых потоков узлов энергетических установок осуществляется с помощью газовых и тепловых завес. В настоящее время наиболее полно исследована эффективность тепловых завес в условиях безградиентного обтекания поверхностей. Однако, перенос этих методов расчета на случаи градиентных течений требует экспериментальной проверки.

Большой практический интерес представляет теплообмен в диффузорных турбулентных пограничных слоях. В последних работах Шлихтинг и Тейлор аналитически показали, что распределение температур в пограничном слое весьма чувствительно к изменениям продольного градиента давления, что противоречит существующему мнению о консервативности профиля температур к изменению градиента давления.

На актуальность проблемы завесного охлаждения поверхностей указывает большое количество экспериментальных работ, посвященных этому вопросу. Существует несколько полуэмпирических и эмпирических методов расчета. Исследованию эффективности тепловых завес посвящены работы Себана, Рейнольдса, Нишиваки, Кутателадзе, Леонтьева, Волчкова и многих других. Однако, исследования этих авторов в большинстве случаев проводились вдали от ступеньки на значительном расстоянии от ступеньки температур, хотя известно, что в непосредственной окрестности ступеньки экспериментальные данные расходятся с результатами расчетов. Вместе с тем аналогичные задачи представляют большой практический интерес. С другой стороны, в этих работах не учитывается влияние градиента давления. Кроме того экспериментальных данных по эффективности тепловой завесы при положи-

тельных градиентах давления нет, поэтому неясно как влияет продольный градиент давления на эффективность и теплообмен в области тепловой завесы. Перечисленные выше вопросы являются предметом исследования настоящей работы.

Диссертация состоит из пяти глав. В первой главе дается анализ опубликованных работ по исследуемой проблеме. Вторая глава содержит описание экспериментальной установки, рабочего участка и методику получения равновесного заторможенного турбулентного пограничного слоя.

Эксперименты проводились в МВТУ им. Н.Э.Баумана на дозвуковой аэродинамической трубе открытого типа. Предусмотрено, что скорость потока в ядре может плавно меняться от 3 м/сек до 50 м/сек. Рабочая часть – прямоугольник размером 300х500х3000 мм. Задняя стенка рабочей части трубы толщиной 4 мм выполнена из стеклопластика и крепится к каркасу восемью винтами, позволяющими плавно изменять ее кривизну, задавая любой градиент давления. Экспериментальный участок представляет собой переднюю стенку рабочей части аэродинамической трубы, на которой развивается изучаемый пограничный слой. Пластина изготовлена из стеклопластика 30х500х2100 мм. По всей поверхности пластины, обращенной к потоку, методом горячего прессования нанесен токопроводящий слой, представляющий собой стеклоткань, пропитанную графитом, затем на поверхность нанесен тонкий слой $\approx 0,4$ мм прозрачной пленки, обеспечивающий электроизоляцию. Нагревательный элемент разделен на четыре части, каждая из которых имеет независимое питание. Для измерения распределения температур вдоль средней линии пластины заподлицо заделаны тридцать хромель-копелевых термопар $\varnothing 0,2$ мм, спаянных встык. Обладая малой тепловой инерционностью и практически отсутствием растекания тепла в продольном направлении эта конструкция пластины позволяет достаточно точно воспроизводить различные тепловые нагрузки (постоянные и ступенчатые).

Аэродинамическая установка оснащена комплектом электронной аппаратуры – термоанемометр фирмы ДИСА, включающем в себя термоанемометр постоянной температуры – для измерения динамических характеристик слоя; термоанемометр постоянного тока – для температурных измерений; вспомогательная аппаратура. Этот комплект электронной аппаратуры позволяет производить

измерения как средних, так и пульсационных характеристик и их корреляций с высокой степенью точности во всем диапазоне имеющихся частот.

В третьей главе описана методика измерения основных параметров пограничного слоя и дана оценка погрешностей.

В четвертой главе диссертации представлены результаты экспериментального исследования теплообмена в равновесном заторможенном турбулентном пограничном слое с параметрами:

$$u_{\infty} X^{-0.253}; C_f = 8 \cdot 10^{-4}; \Pi = \frac{\delta^*}{\zeta_{cr}} \frac{dP}{dX} = 14,5; H = 1,935.$$

На рис. 1 представлены в виде дефекта профили скорости, там же для сравнения нанесены равновесные пограничные слои Клаузера, нетрудно заметить, что исследуемый слой равновесный и находится ближе к отрыву.

На рис. 2 приведено сравнение распределения трех компонент пульсаций скорости поперек слоя для безградиентного обтекания (Клебанов) и для $\frac{dP}{dX} > 0$. Из графика видно, что уровень пульсаций скорости, как продольной, так и поперечной в заторможенных пограничных слоях выше, чем при обтекании пластины и максимум смещается к середине слоя. На рис. 3 приведена продольная пульсация $\bar{u}'$ в $f(y^+ = \frac{245}{y})$. Как известно, при безградиентном обтекании пластины продольные пульсации скорости имеют один максимум. Из рассмотрения графика видно, что пульсации $\bar{u}'$ имеют два максимума: первый — как и при безградиентном обтекании расположен в переходной области ($y^+ \approx 20$); второй — смещен к середине слоя. Такое поведение продольных пульсаций говорит о наличии двух источников производства энергии турбулентности: стенка и градиент давления.

В этой же главе приведены результаты экспериментального исследования влияния положительного градиента давления на средние и пульсационные характеристики теплового слоя, развивающегося внутри динамического при $q_{cr} = const$.

Тепловой поток на стенке определялся по наклону профиля температур в области вязкого подслоя ($y^+ < 5$), где распределение температур линейное. По найденным значениям теплового потока на стенке и известным значениям скорости и температурного напора находились локальные значения чисел Стантона, приведенные на рис. 4. Нетрудно заметить, что числа Стантона,

построенные в зависимости от Re_{τ}^{**} , подсчитанного по толщине потери энергии, легили значительно ниже известной зависимости для пластины при безградиентном обтекании. При этом, с увеличением чисел Re_{τ}^{**} различие между "стандартной" зависимостью и экспериментальными данными уменьшается. Это различие объясняется разной толщиной динамического и теплового слоев. На этом же рисунке приведены числа Стантона, пересчитанные по скорости на границе теплового пограничного слоя U_{τ} - получено хорошее совпадение экспериментальных данных со "стандартным" законом. Такой способ обработки был ранее предложен Э.П. Волчковым и В.Я. Левченко.

На рис. 5 представлено распределение средних температур в поперечном сечении пограничного слоя в виде $\frac{\Delta T}{\Delta T_{\infty}} = f(y/\delta_{\tau})$, для сравнения там же нанесен профиль температур для безградиентного обтекания ($n_2 = 1/7$), видно, что в заторможенном слое профиль температур более заполнен, при этом показатель степени, определенный по экспериментальным данным, равен $n_2 = 1/12,5$. Следовательно, продольный положительный градиент давления деформирует не только профиль скорости, но и профиль средних температур. При этом деформация профилей скорости и температуры при положительном градиенте давления имеет равные тенденции.

Если представить профили скорости и температуры в форме степенной зависимости:

$$\frac{U}{U_{\infty}} = \left(\frac{y}{\delta}\right)^{n_1}; \quad \frac{\Delta T}{\Delta T_{\infty}} = \left(\frac{y}{\delta_{\tau}}\right)^{n_2}, \quad (1)$$

то пользуясь консервативностью закона теплообмена к градиенту давления, можно аналитически получить связь между n_1 и n_2

Запишем уравнения импульсов и энергии:

$$\frac{d\delta^{**}}{dx} + (2+H)f = \frac{C_f}{2}; \quad (2)$$

$$\frac{d\delta_{\tau}^{**}}{dx} + \frac{\delta_{\tau}^{**}}{U_{\infty} \Delta T_{\infty}} \frac{d}{dx}(U_{\infty} \Delta T_{\infty}) = 3t, \quad (3)$$

где

$$f = \frac{\delta^{**}}{U_{\infty}} \frac{dU_{\infty}}{dx} \quad (4)$$

Пусть $\Delta T_{\infty} = \text{const}$ (что справедливо вдали от начала нагрева при подводе тепла по закону $q_{cr} = \text{const}$), тогда, после

несложных арифметических преобразований и, учитывая условия равновесия, можно записать:

$$\delta^{**} = \left[\frac{C_1}{2} - (2+H)f \right] x; \quad (5)$$

$$\delta_r^{**} = \left(3t - \frac{\delta_r^{**}}{\delta^{**}} f \right) x, \quad (6)$$

где

$$\tilde{\delta}_r^{**} = \frac{\delta_r^{**}}{\delta_r}; \quad \tilde{\delta}^{**} = \frac{\delta^{**}}{\delta}; \quad \delta_r = \delta.$$

Разделив уравнение (6) на (5) получим зависимость:

$$\frac{\frac{C_1}{2} - f(H+1)}{3t} = \frac{n_1(n_1+n_2+1)}{n_2(2n_1+1)}. \quad (7)$$

При расчете по формуле (7) исследуемых сечений, где $\Delta T \approx \text{const}$, получен показатель степени в степенном распределении температур $n_2 = 1/12,4$, т.е. получено достаточно хорошее совпадение с показателем степени, определенным непосредственно по экспериментальным профилям $n_2 = 1/12,5$, что подтверждает вывод о влиянии положительного градиента давления на форму профиля температур (показатель степени для профиля скорости был взят экспериментальный $n_1 = 1/2,5$).

На рис. 6 распределение температур представлено в координатах стенки:

$$T^* = 5,9 \log y^* + 3,2, \quad (8)$$

где

$$T^* = \frac{\Delta T}{\Delta T_\infty \sqrt{3t_r}}; \quad y^* = \frac{y u_r \sqrt{3t_r}}{\nu} \quad (9)$$

Численные коэффициенты в уравнении (8) были определены по экспериментальным данным. На том же рисунке для сравнения приведены данные при безградиентном обтекании пластины (Блом, Белов). Нетрудно заметить хорошее совпадение этих данных, т.е. при правильно выбранных масштабах скорости зависимость (8) универсальна. Если же число Стантона определять по скорости на внешней границе динамического слоя, то кривые расслаиваются и ложатся выше (заштрихованная область).

На рис. 7 приведены распределения пульсаций температуры в поперечных сечениях пограничного слоя, там же для сравнения показано распределение пульсаций температур для безградиент-

ного обтекания пластины. Из сопоставления видно, что зависимость температурных пульсаций имеет одинаковый характер в обоих случаях, однако, в заторможенных течениях ($\frac{q''}{q''_0} > 0$) величина относительных пульсаций температуры значительно ниже, чем на пластине. Такое поведение пульсационной составляющей температуры обусловлено более интенсивным процессом перемешивания жидкости во внешней части пограничного слоя, вызванного ростом интенсивности пульсаций скорости (рис. 2) под влиянием положительного градиента давлений.

В пятой главе приведены экспериментальные результаты по исследованию теплообмена при ступенчатом подводе тепла в условиях сильно заторможенного турбулентного пограничного слоя.

Экспериментальное исследование проводилось в два этапа. В первой серии опытов тепло по закону $q_{cr} = const$ подводилось только в первую часть пластины, а вторая ее часть находилась в условиях адиабатической стенки. Во второй серии опытов исследования проводились при ступенчатом подводе тепла с отношением тепловых потоков $q_{cr}/q_{cr2} = 2,5$. Эти исследования проводились с целью подтверждения справедливости метода суперпозиции в застойной зоне при положительном градиенте давления. На рис. 8 приведены профили температур, полученные вычитанием профилей температур на адиабатической стенке из соответствующих профилей температур при отрицательной тепловой ступеньке и отнесенные к равновесной температуре, введенной Эккертом:

$$\frac{\Delta T_{q_{cr2}} - \Delta T_{ad}}{\Delta T_{q_{cr2}} - \Delta T_{ad\infty}} = \frac{\Delta T_{q_{cr2}} - \Delta T_{ad}}{T_{cr2} - T_{crad}} = f(\eta/\delta_1). \quad (10)$$

Нетрудно заметить, что профили температуры имеют "нормальный" вид, начиная с расстояний порядка 100 мм от тепловой ступеньки и далее. Однако, в сечениях, расположенных в непосредственной близости от ступеньки, наблюдается значительное отличие профилей температур от "нормального" профиля. Это отличие можно объяснить соизмеримостью толщины теплового слоя в окрестности ступеньки с величиной вязкого подслоя, в котором закон переноса тепла имеет другой характер, отличный от переноса тепла в турбулентной области пограничного слоя. Для проверки правильности применения метода суперпозиции при ступенчатом подводе тепла был проведен эксперимент, в котором первая часть пла-

стины находилась в условиях адиабатической стенки, а ко второй ее части подводилось тепло по закону $q_{сг} = q_{сг2} = \text{const}$. На том же рисунке пунктиром нанесены профили температуры для данного случая - видно хорошее совпадение экспериментальных данных (нагревалась только вторая часть пластины) с данными, полученными путем вычитания одного режима из другого. На основании консервативности закона теплообмена к градиентному течению и с использованием метода суперпозиции получена формула для расчета эффективности тепловой завесы в градиентном потоке:

$$\theta = \left(\frac{U_\infty}{U_1}\right)^{0,8} \left(\frac{x}{x_1}\right)^{0,2} \left[1 - \left(\frac{x-x_1}{x}\right)^{\frac{M_2}{(m+1)(n+1)-n}}\right], \quad (II)$$

где U_1 - скорость на внешней границе слоя в сечении x_1 . Это общее уравнение эффективности тепловой завесы; для расчета по нему необходимо подставить закон изменения скорости на внешней границе и соответствующие M_1 и M_2 .

Для исследуемого равновесного заторможенного слоя:

$$U_\infty = C X^M,$$

где $M = -0,253$; $M_1 = \frac{1}{2,5}$; $M_2 = \frac{1}{12,5}$; $m = 0,25$.

Тогда имеем:

$$\theta = \left(\frac{x}{x_1}\right)^{0,4} \left[1 - \left(\frac{x-x_1}{x}\right)^{0,05}\right]. \quad (I2)$$

На рис. 9 приведено сравнение экспериментальных данных по эффективности тепловой завесы ($\theta = \frac{\Delta T_{сг}}{\Delta T_1}$) в исследуемом равновесном заторможенном турбулентном пограничном слое с расчетом по формуле (I2). Видно, что формула дает хорошее совпадение с экспериментом, начиная со значений $\frac{x}{x_1} \approx 1,03$, где x_1 - длина нагреваемого участка, при этом положительный градиент давления ухудшает эффективность тепловой завесы.

Для сравнения на том же графике нанесены кривые, рассчитанные по методике Кутателадзе - Леонтьева для разных $\beta_{\max}$: $\beta_{\max} = 9$ и $\beta_{\max} = 19,1$. Удовлетворительное совпадение с экспериментом дает случай с $\beta_{\max} = 19,1$, начиная со значений $\frac{x}{x_1} > 1,2$. Для определения $\beta_{\max} = 19,1$ использовались экспериментальные значения M_1 и M_2 . Таким образом, эффективность тепловой завесы в диффузорном турбулентном пограничном слое на

расстояниях $\frac{x}{x_1} > 1,2$ можно считать по методике Кутателадзе - Леонтьева, но для этого необходимо знать β_{max} - коэффициент, учитывающий деформацию температурного профиля в области тепловой завесы.

Учитывая, что многие авторы принимают $\beta_{max} = 9$ для всех случаев: вдув, отсос, градиент - был проведен эксперимент по определению величины β_{max} . Для этого грелась первая четверть пластины, а три четверти находились в условиях адиабатической стенки. В результате была получена зависимость $\beta = f(x)$. Максимальная величина, полученная в эксперименте $\beta = 14$, не исключено, что при $\frac{x}{x_1} \rightarrow \infty$ эта величина может достигнуть значения $\beta_{max} = 19$, полученного аналитически.

По результатам работы были сделаны выводы:

1. Получен равновесный заторможенный турбулентный пограничный слой с параметрами: $N = 1,935$; $G = 24,5$; $\Pi = 14,5$; $f = -3 \cdot 10^{-3}$.

2. Положительный градиент давления приводит к увеличению интенсивности пульсационного движения масс жидкости во внешней части пограничного слоя. Продольная составляющая пульсации скорости имеет два максимума: один как и в случае пластины в переходной области ($y^+ \approx 20$), другой - во внешней части пограничного слоя - это указывает на наличие в диффузорных пограничных слоях двух областей производства турбулентной энергии.

3. Закон теплообмена остается консервативным к изменению положительного градиента давления, а профиль температур имеет универсальный характер в координатах стенки, если в критерии Стантона скорость определять на внешней границе теплового пограничного слоя.

4. Профиль средних температур в диффузорном турбулентном пограничном слое становится более заполненным ($N_2 = 1/12,5$) в результате более интенсивного пульсационного движения жидкости во внешней части слоя.

5. Пульсации температур в сечении заторможенного пограничного слоя имеют такой же качественный характер, как и при $dP/dx = 0$, однако, уровень их ниже чем при $dP/dx < 0$.

6. Получена зависимость между показателями степени теплового и гидродинамического пограничных слоев в стеченном

представлении профилей скорости и температур для равновесных диффузорных слоев.

7. Экспериментально получены распределения средних и пульсационных характеристик теплового пограничного слоя в случае отрицательной тепловой ступеньки $q_{ст1}/q_{ст2} = 2,5$ и подтверждено предположение о применимости метода суперпозиции как в отношении средних, так и пульсационных характеристик.

8. Получены экспериментальные данные по эффективности тепловой завесы для данного диффузорного турбулентного пограничного слоя – положительный градиент давления ухудшает эффективность тепловой завесы.

9. Получены экспериментальные данные по $\beta = \frac{\delta_{тер}^{**}}{\delta_{тер}^{*}}$ – положительный градиент давления приводит к увеличению $\beta_{нох}$.

10. Предложена аналитическая зависимость для расчета эффективности тепловой завесы в диффузорном турбулентном пограничном слое.

Результаты работы докладывались и обсуждались:

1. на научно-технической конференции факультета "Энергомашиностроение" МВТУ им. Баумана, посвященной XXV съезду КПСС, декабрь, 1975;

2. на Всесоюзном Симпозиуме по методам аэрофизических исследований, ИТПМ СО АН СССР, 1976 г.;

3. на V Всесоюзной конференции по тепломассообмену, Минск, 1976 г..

Материалы диссертации изложены в статьях:

1. А.И. Леонтьев, Е.В. Шишов, В.П. Клов, В.Н. Афанасьев, В.М. Белов. Аэродинамическая установка для экспериментального исследования структуры турбулентных пограничных слоев, Труды МВТУ, № 195, 1975.

2. Е.В. Шишов, В.М. Белов, В.Н. Афанасьев. Экспериментальное исследование теплообмена в равновесном турбулентном пограничном слое при большом положительном градиенте давления, ТВТ, т. XIII, № 6, 1975.

3. А.И. Леонтьев, Е.В. Шишов, В.М. Белов, В.Н. Афанасьев. Средние и пульсационные характеристики теплового турбулентного пограничного слоя и теплообмен в диффузорной области, Тепломассообмен – У, т. I, ч. I, Минск, 1976.

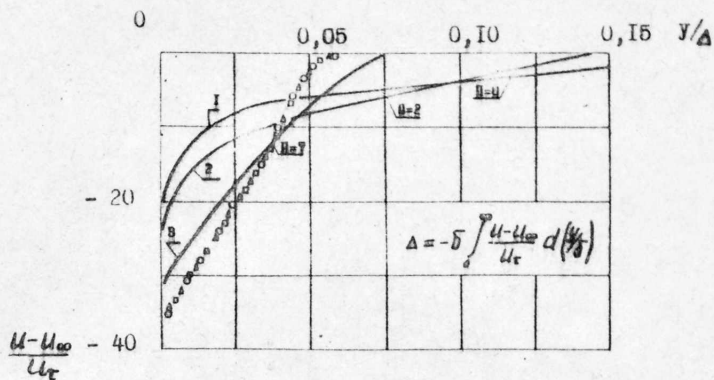


рис. 1. Профиль дефекта скорости в турбулентном пограничном слое.
1, 2, 3 - Клаузер.

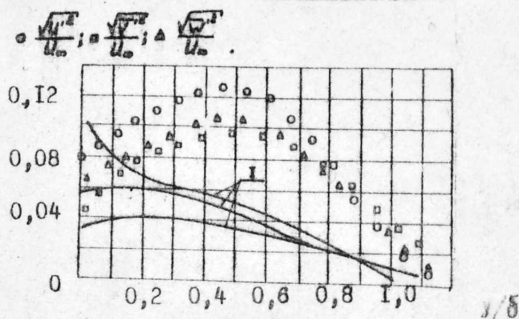


рис. 2. Сравнение пульсаций скорости для

$$\frac{dP}{dX} > 0 \quad \text{и} \quad \frac{dP}{dX} = 0.$$

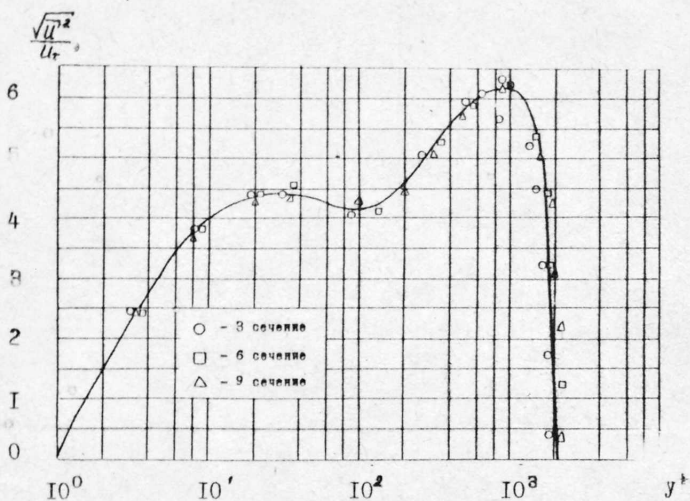


Рис. 3. Распределение продольных пульсаций скорости $\overline{u'}$.

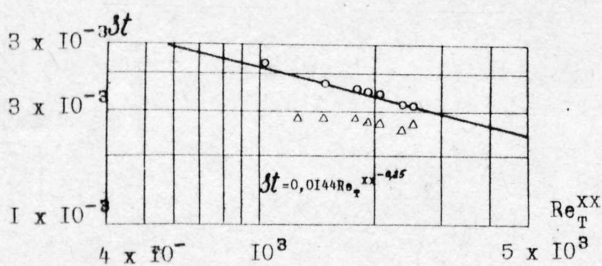


Рис. 4. Зависимость числа Стантона от Re_T^{xx} .

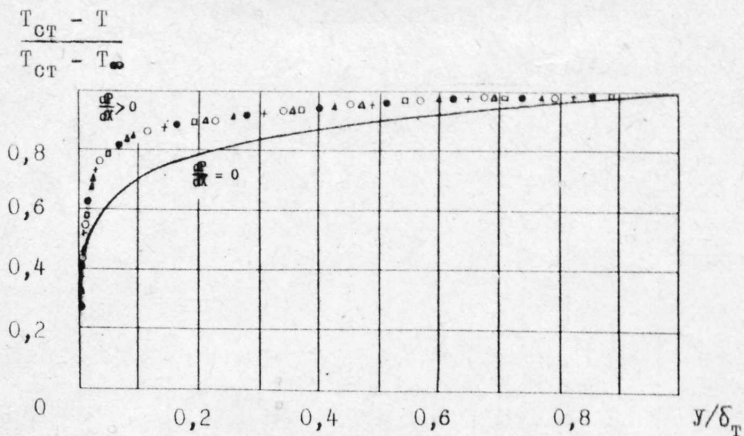


Рис. 5. Распределение температур в заторможенном турбулентном пограничном слое.

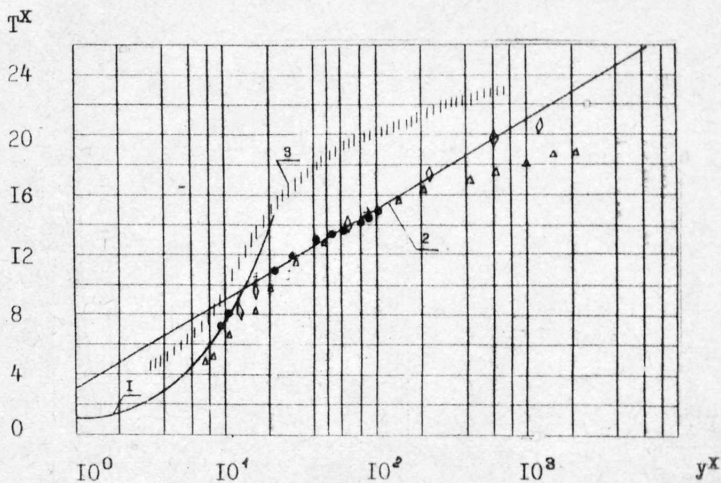


Рис. 6. Универсальное распределение профилей температуры.

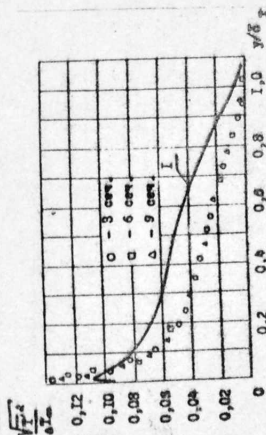


рис. 7. Распределение пульсаций температуры.

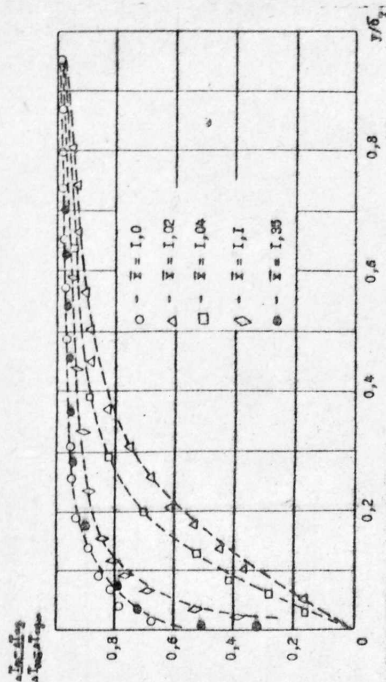


рис. 8. Профили температур, полученные вычитанием профилей на адиабатической стенке из соответствующих профилей

2 ст, 19 ст₂ = 2,5.

рис. 9. Эффективность тепловой завесы.

1, 2 - Кутателадзе, Леонтьев;
3 - расчет по (12).

