

М 492/78
Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена
Трудового Красного Знамени высшее техническое училище имени

Н.Э.Баумана

На правах рукописи

АТАЯН Роберт Шагенович

УДК 532.517. :536.24

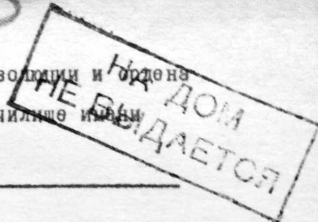
ТЕПЛОМАССОБМЕН ЗА УСТУПОМ НА ПРОНИЦАЕМОЙ СТЕНКЕ

Специальность 01.04.14 - Теплофизика и молекулярная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Москва - 1988



Работа выполнена в Московском высшем техническом училище
им. Н. Э. Баумана

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор ШИШОВ Е.В.

Официальные оппоненты - д.т.н., профессор ПОЛЯКОВ В.М.
к.т.н., доцент БЕЛОВ В.М.

Ведущее предприятие - ИЛМ АН СССР

Защита состоится 26 " декабря 1988 г.
в 14⁰⁰ на заседании специализированного Совета К.053.15.08
"Энергетические установки" при Московском высшем техническом
училище имени Н.Э.Баумана по адресу: г.Москва, Лефортовская
набережная, д.1, факультет "Энергомашиностроение".

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные
печатью учреждения, просим выслать в адрес Совета: 107005, Мос-
к. Э.Баумана, ученому сек-

и в библиотеке МВТУ им.Н.Э.

Ганчев 1988 г.

Ганчев Б.Г.

М1492178

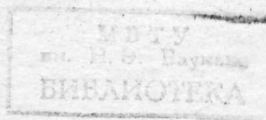
1 п.л. Зак. 1092 Тир. 100

Актуальность работы. Проектирование и эксплуатация современных энергетических установок привлекли внимание исследователей к течениям, характеризующимся отрывом потока от стенки, присоединением и формированием нового пограничного слоя. Такая картина, как правило наблюдается в местах резкого изменения проходного сечения проточной части, топочных камер сгорания, лопаточных каналах газовых турбин, диффузорах и т.д. В результате существенно искажаются гидродинамика потока и закономерности теплообмена, что приводит к большим потерям энергии. В зонах присоединения высокотемпературного потока газа возникает опасность разрушения и деформации стенок каналов, что существенно тормозит повышение начальной температуры газа двигателя. Этот факт вызывает необходимость поиска новых путей совершенствования проточных частей и их оптимизации, с точки зрения потерь энергии, а также тепловой защиты элементов конструкций. Однако отрыв и последующее присоединение могут дать и положительный эффект - интенсифицировать теплообмен, если их использовать в качестве турбулизатора потока в теплообменном устройстве.

Рассмотрение данной проблемы определяется не только чисто техническими приложениями, но и потребностями научного характера - глубже познать механизм турбулентного переноса с целью рационального управления структурой потока и расчетного прогнозирования характеристик течения и теплообмена. Отсутствие систематизированных экспериментальных результатов исследования течений, усложненных отрывом и вдувом, затрудняет развитие численных методов расчета и теории тепловой защиты.

Цель работы заключается в подробном экспериментальном, включая измерения тройных корреляций, исследовании структуры турбулентного течения, усложненного отрывом и вдувом, для выяснения механизмов переноса импульса и теплоты. На базе полученной информации разработать и физически обосновать дифференциальный метод расчета отрывного течения и оценить возможность применения интегральных методов расчета теплообмена на проницаемой поверхности.

Методы исследования. В работе использовались экспериментальные и теоретические методы исследования. Экспериментальный метод основан на методике измерений средних и пульсационных по-



лей скорости и температуры с помощью комплекта аналоговой термоанемометрической аппаратуры. Теоретический метод основан на решении дифференциальных уравнений переноса методом конечных разностей.

Научная новизна. Проведено комплексное научное исследование пульсационной структуры и процессов турбулентного переноса импульса и теплоты в отрывном течении со вдувом. Впервые с помощью термоанемометрической аппаратуры определены индивидуальные составляющие транспортных уравнений переноса энергии турбулентности, касательных турбулентных напряжений, "энергии" температурных пульсаций, продольной и поперечной составляющих турбулентного теплового потока, позволившие предложить физически обоснованные аппроксимации корреляций пульсационных величин. Проведены оценки справедливости основных гипотез и допущений, положенных в основу современных методов расчета. Показана возможность применения интегральных методов расчета теплообмена за уступом при умеренном распределенном вдуве. На базе экспериментальных исследований сформулированы новые гипотезы.

Практическая ценность. Создана методика расчета отрывного течения со вдувом за уступом, позволяющая прогнозировать теплообмен в условиях тепловой защиты.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 17-й Научно-технической конференции молодых ученых и специалистов ИТФ АН УССР (Киев, 1986 г.), на конференции "Гидрогазодинамика, тепло- и массообмен в энергетических установках" в ИТМО АН БССР (Минск, 1986 г.), на У1-й Всесоюзной школе-семинаре "Современные проблемы газодинамики и тепломассообмена и пути повышения эффективности энергетических установок" (Москва, 1987 г.), на московском межвузовском семинаре (Москва, 1987 г.), на Международном форуме по тепломассообмену (Минск, 1988 г.), на научно-технических семинарах кафедры "Теоретические основы теплотехники" МВТУ им. Н.Э.Баумана.

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 5 печатных работах и трех научно-технических отчетах МВТУ.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, перечня использованной литературы. Работа выполнена на 159 страницах, включая 96 страниц машинописного текста, 49 страниц рисунков, список использованной литературы на 14 страницах, состоящий из 139 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследуемой проблемы, сформулирована цель работы и перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе дан критический обзор экспериментальных и теоретических результатов исследования отрывных течений. Рассмотрены режимы отрывного обтекания и схемы развития потока после отрыва. Приведены известные аппроксимации для расчета влияния характеристик предотрывного течения на длину зоны рециркуляции, распределение статического давления на стенке, теплообмен за уступом. Рассмотрены модели турбулентности, замыкаемые на уровне переноса одноточечных корреляционных моментов, двухпараметрические и трехпараметрические модели. При исследовании теплообмена в систему уравнений дополнительно включается уравнение энергии, для замыкания которого используется число Pr_t . Показано, что существующие экспериментальные данные по структуре турбулентности не позволяют вынести достоверность предложенных аппроксимаций, используемых для замыкания моделей турбулентности, так как они основаны на результатах, полученных при исследовании пристенных течений, что подвергает сомнению используемые методы расчета и препятствует выбору достаточного для практики уровня замыкания. В частности, при исследовании отрывных течений с помощью однопараметрических моделей не обосновывается выбор метода расчета, основанного на гипотезах Прандтля и Буссинеска. При исследовании теплообмена расчетные значения чисел Pr_t не подтверждаются экспериментальными данными. Полностью отсутствуют данные о влиянии распределенного вдува за уступом на структуру течения, что исключает возможность применения интегральных методов расчета теплообмена.

Во второй главе описывается экспериментальная установка, используемое оборудование и методика эксперимента. Исследования проведены в МВТУ им. Н.Э.Баумана, на дозвуковой аэродинамической трубе открытого типа с рабочей частью размером 300х500х3000 мм. Экспериментальный рабочий участок представляет собой переднюю (боковую) стенку трубы и состоит из двух плит, которые крепятся на разных уровнях. Это позволяет в месте стыка делать уступ нужной высоты. Для исследования влияния вдува за уступом на структуру течения была изготовлена пористая пластина размерами 15х410х

610 мм, состоящая из 17 секций и полученная методом горячего прессования из порошка полиметилметакрилата. Измерения температуры и давления на стенке производились хромель-копелевыми термомпарами и отверстиями статического давления. Комплект аппаратуры 55М фирмы "ДИСА" позволял производить измерения средних и пульсационных характеристик гидродинамического и температурного полей, а также многочисленные корреляции. Для проведения измерений использовались одно- и двухниточные зонды, методика обработки сигналов подробно изложена в отечественной и зарубежной литературе. Корреляции между пульсациями скорости и температуры измерялись с помощью 3-х ниточного комбинированного зонда. Коэффициенты поверхностного трения и числа St определены по соответствующим распределениям скорости и температуры вблизи стенки. Используемая методика позволила определить основные средние и пульсационные характеристики со следующими среднеквадратичными погрешностями: однониточный датчик: $\delta_u = \pm 1,3\%$; $\delta_{u'} = \pm 1,72\%$; $\delta_T = \pm 0,83\%$; $\delta_\theta = \pm 1,2\%$; двухниточный датчик: $\delta_u = \pm 2,4\%$, $\delta_{u'} = \pm 4,1\%$; $\delta_v = \pm 3,3\%$; $\delta_{v'} = \pm 7,2\%$; $\delta_{uv} = \pm 9\%$; $\delta_{v\theta} = \pm 12\%$.

В третьей главе представлены результаты исследования гидродинамических характеристик течения при обтекании уступа. С уступа высотой $H = 30$ мм отрывается развитой пограничный слой; $\delta_s/H = 1,6$; $Re_H = 3,8 \cdot 10^5$; отношение ширины канала к высоте уступа составляло 16,8. В качестве параметра вдува была выбрана интенсивность вдува: $F = (\rho V)_{ст} / (\rho U)_\infty$, чтобы избежать отрыва потока в нижнем углу уступа интенсивность вдува с приближением к уступу снижалась, причем в области присоединения и релаксации потока тепловой параметр вдува $b_T = F / St_0$ был равен $2 \pm 0,2$, где St_0 число $St / Re_x = idem$ при $b_T = 0$. Основные измерения проводились в четырех до уступа и четырех сечениях за уступом.

Результаты исследования показали, что умеренный вдув незначительно влияет на длину зоны отрыва, приводит к снижению коэффициентов поверхностного трения и статического давления, рис.1. Обработанные в переменных закона "стенки" профили скорости свидетельствуют о систематическом отклонении от стандартной зависимости (рис.2). Вдув сопровождается уменьшением заполненности профилей (рис.3). Распределения продольных пульсаций скорости хорошо согласуются с данными, полученными для пластины (рис.4), в то время как уровень поперечных пульсаций скорости значитель-

но выше, чем при безградиентном обтекании пластины (рис.5). Коэффициенты корреляций в пристенной области незначительны (рис.6). В результате, несмотря на значительный уровень нормальных компонент тензора напряжений, вклад турбулентности в обмен импульсом в пристенной области незначителен (рис.7). О физических условиях, происходящих в отрывном течении, дают представление распределения коэффициента кинематической турбулентной вязкости ν_t и длины пути смешения ℓ . Полученные данные свидетельствуют о росте масштабов турбулентного обмена, как по направлению основного потока, так и с удалением от стенки (рис.8, рис.9). В слое смешения наблюдается приближительное постоянство ν_t и ℓ . Представленные на рис.10 вычисленные и обработанные в переменных "закона" стенки значения ℓ показывают удовлетворительное соответствие зависимости $\ell^+ = 0,4 y^+$. Вдув малой и умеренной интенсивностей незначительно влияет на перераспределение характеристик течения.

Структура механизма переноса за уступом наглядно выявляется при анализе вычисленных по экспериментальным данным членов уравнения энергии турбулентности:

$$\begin{aligned} U \frac{\partial k}{\partial x} + V \frac{\partial k}{\partial y} = & - \bar{u} \bar{v} \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) - (\bar{u}^2 - \bar{v}^2) \frac{\partial U}{\partial x} \\ & - \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\bar{\rho} U^3}{\rho} + \bar{k} U \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\bar{\rho} V^4}{\rho} + \bar{k} V \right] + \epsilon \end{aligned} \quad (I)$$

где 1 - конвекция; 2 - генерация; 3,4 - диффузия; 5 - скорость диссипации энергии турбулентности. Экспериментально определенные распределения составляющих уравнения (I) приведены к безразмерному виду с помощью масштабов δ и U_δ , где U_δ и

δ - максимальная скорость обратного тока в данном сечении и соответствующее ей расстояние от стенки, и представлены на рис.11. Уровень генерации незначителен из-за малости турбулентных касательных напряжений. Влияние генерации подавляется конвекцией и в особенности диффузией, направленной к стенке. Скорость диссипации практически уравнивает диффузию. В работе показывается, что градиентное представление диффузии удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными в пристенной области ($y^+ < 100$). Значительное влияние диффузии на механизм переноса в пристенной области обуславливает непостоянство отношения $\bar{u} \bar{v} / k$ (рис.12). Проведенный анализ вызывает необходимость рассмотре-

ния транспортного уравнения переноса турбулентных касательных напряжений:

$$\begin{aligned}
 -U \frac{\partial \bar{u} \bar{v}}{\partial x} - V \frac{\partial \bar{u} \bar{v}}{\partial y} = & \bar{v}^2 \frac{\partial U}{\partial y} + \bar{u}^2 \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{3}{\rho} \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) - \\
 & - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\bar{p} \bar{v}}{\rho} + \bar{u}^2 \bar{v} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\bar{p} \bar{u}}{\rho} + \bar{u} \bar{v}^2 \right) + \epsilon
 \end{aligned} \quad (2)$$

где 1 - конвекция; 2 - генерация; 3,4 - диффузия; 5 - скорость диссипации касательных напряжений. Экспериментально определенные составляющие уравнения (2) приведены к безразмерному виду с помощью масштабов δ и U_δ и представлены на рис.13. Как видно, в отличие от течения в пограничном слое с $\bar{u} \bar{v} / K = 0,3$ уровень диффузии и конвекции в нашем случае соизмерим с генерацией, вследствие чего константа C_μ в выражении для турбулентной вязкости в форме Придтля-Колмогорова: $\bar{u}_t / \bar{v} = C_\mu \cdot K^2 / \bar{v} \cdot \epsilon$, принимаемая в стандартной "К - ϵ " модели постоянной и равной 0,09, в действительности является функцией пульсационного поля скоростей. В работе показано, что использование градиентного представления диффузии в уравнении (1) и соотношении Придтля для пульсационных полей: $u_i \approx \ell_i \cdot (du/dy)$ позволяют получить для $\bar{u}_t$ выражение: $\bar{u}_t = \ell^2 \cdot (du/dy)$. Откуда следует вывод, что в течениях с преобладающим влиянием диффузии и скорости диссипации энергии турбулентности, остаются справедливыми соотношения, положенные в основу моделей турбулентности, основанных на гипотезе длины пути смещения и понятии вихревой вязкости.

В четвертой главе представлены результаты исследования тепловых характеристик потока. Несмотря на то, что размер рециркуляционной области остался без изменений, пик теплоотдачи заметно снизился и сместился в сторону уступа (рис.1). Причем с ростом интенсивности вдува уровень снижения теплоотдачи возрастает. В пристенной области наблюдается одновременное снижение как градиента, так и заполненности температурного профиля. Существенное отличие величины $\bar{S} = (2St/c_f)$ от 1 указывает на невозможность применения интегральных методов расчета, основанных на аналогии Рейнольдса. Обработанные в переменных закона "стенки" профили температур обнаруживают систематическое отклонение от логарифмической зависимости (рис.2). Аналогичная картина наблюдается и в распределениях величины $\ell_T^+ = \ell_T \cdot U_\tau / \bar{v}$, где $\ell_T = \sqrt{5/2} \cdot (dT/dy)$.

свидетельствующих о том, что $X_t > 0,4$ (рис.14). По измеренным профилям скорости и температуры определены числа Pr_t (рис.15), величина которого в пристенной области составляет $0,75 \pm 1,0$ и предполагает наличие аналогии между переносом импульса и теплоты, и возрастает с удалением от стенки. Сложный характер течения в пристенной области вызывает необходимость рассмотрения транспортного уравнения переноса турбулентной величины $\overline{v\theta}$:

$$\begin{aligned} U \frac{\partial \overline{v\theta}}{\partial x} + V \frac{\partial \overline{v\theta}}{\partial y} = & -(\overline{uv} \frac{\partial T}{\partial x} + \overline{v^2} \frac{\partial T}{\partial y} + \overline{u\theta} \frac{\partial V}{\partial x} + \overline{v\theta} \frac{\partial V}{\partial y}) - \\ & - (\frac{\partial \overline{uv\theta}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v^2\theta}}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{\rho\theta}}{\partial y}) - \frac{1}{\rho} \rho \frac{\partial \theta}{\partial y} + \epsilon \end{aligned} \quad (3)$$

где 1 - конвекция; 2 - производство; 3 - диффузия; 4 - перераспределение; 5 - скорость диссипации и молекулярный перенос (4,5 не измерялись). Результаты измерений приведены к безразмерному виду с помощью масштабов ΔT , U_∞ , H и показаны на рис.16. Как видно, генерация турбулентной величины $\overline{v\theta}$ превосходит вклад диффузии и конвекции. Сравнение рис.16 и рис.13 обнаруживает подобие в механизмах переноса $\overline{uv}$ и $\overline{v\theta}$. Что позволяет моделировать турбулентную величину $\overline{v\theta}$ с помощью моделей турбулентности, основанных на гипотезе длины пути смещения и понятии турбулентной теплопроводности. В работе показано, что член перераспределения в уравнении переноса (3) можно с удовлетворительной точностью аппроксимировать выражением $\frac{1}{\rho} \rho \frac{\partial \theta}{\partial y} = C_\theta \frac{\epsilon}{\overline{uv}} \overline{v\theta}$, где $C_\theta = 3,5$.

В пятой главе представлены результаты интегральных и дифференциальных методов расчета. Результаты исследования теплообмена обобщены в виде относительных законов и представлены на рис.17 и рис. 18. Закон теплообмена для течения, усложненного отрывом и вдувом, можно представить в виде:

$$St = St_R \cdot \sqrt{\frac{x}{x_R}} \cdot (1 - \tilde{b}_T)^{4/3} \quad \left(\frac{x}{x_R} < 1 \right)$$

$$St = 2,6 \cdot St_R \cdot (x/H)^{-1/2} \cdot (1 - \tilde{b}_T)^2 \quad \left(\frac{x}{x_R} > 1 \right)$$

Решаемая система уравнений представляет собой: уравнение нераз-

рывности, уравнения количества движения в направлениях осей X и Y, уравнение энергии. Система уравнений сводилась к конечным разностям и решалась с помощью метода SIMPLE.

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

$$\rho U \frac{\partial U}{\partial x} + \rho V \frac{\partial U}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \mu_{\text{эфф}} \cdot \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu_{\text{эфф}} \cdot \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] \quad (5)$$

$$\rho U \frac{\partial V}{\partial x} + \rho V \frac{\partial V}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho \mu_{\text{эфф}} \cdot \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu_{\text{эфф}} \cdot \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] \quad (6)$$

$$c_p \rho \left(U \frac{\partial T}{\partial x} + V \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left[(\lambda + \lambda_t) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\lambda + \lambda_t) \frac{\partial T}{\partial y} \right] \quad (7)$$

В расчетах используется двухслойная алгебраическая модель турбулентной вязкости. В отличие от модели Себеси данная модель определяет масштаб турбулентности не по толщине пограничного слоя, а по завихренности, поскольку в условиях отрыва трудно определить толщину пограничного слоя. Во внутренней области турбулентная вязкость определяется по соотношению:

$$\mu_t = \rho \ell^2 / \omega \quad (8)$$

где
$$\omega = \sqrt{\left(\frac{\partial U}{\partial y} - \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2} \quad (9)$$

$$\ell = xy \left[1 - \exp(-y/2\delta \cdot \nu \left(\frac{\gamma_w}{\rho} + \frac{dp}{dx} \frac{y}{\rho} + V_{\text{ст}} U \right)^{-1/2}) \right] \quad (10)$$

Значение X на основании результатов исследования (рис.10) было выбрано равным $X = 0,41$. В слое смешения, как свидетельствуют результаты наблюдения, приблизительно постоянство μ_t . В этой части течения для описания турбулентной вязкости используется гипотеза Клаузера:

$$\mu_t = K \cdot c_{\text{ср}} \cdot F_{\text{сл}} \cdot F_{\text{клеб}} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} K &= 0,0168, \\ c_{\text{ср}} &= 0,65, \\ c_{\text{сл}} &= 0,25. \end{aligned} \quad F_{\text{сл}} = \min \left\{ \frac{y_{\text{max}} \cdot F_{\text{max}}}{c_{\text{сл}} \cdot y_{\text{max}} \cdot U_{\Delta}^2 / F_{\text{max}}} \right.$$

$F(y) = y/|w|$; $F'_{\text{клет}} = [1 + 5,5 \cdot (C_{\text{клет}} \cdot y/y_{\text{max}})^6]^{-1}$
 Для описания турбулентной теплопроводности используется модель, предложенная Себеси:

$$\lambda_t = \rho \cdot c_p \cdot \chi \cdot \chi_t [1 - \exp(-y^+ / 25)]^2 / |w| \quad (12)$$

где значение χ_t на основании опытных данных (рис. I4) выбрано $\chi_t = 0,58$. Результаты расчетов представлены на рис. I9-рис. 23. В качестве начальных условий задавались профили скорости и тепловые потоки. Расчетная сетка неравномерная и состояла из 32x32 узлов. В пристенной области расчетная сетка сгущалась. Численные расчеты были выполнены на ЭВМ ЕС-1036.

Как видно, предложенный метод расчета гидродинамики и теплообмена, основанный на использовании экспериментально проверенных аппроксимаций, позволяет получить значения средних и интегральных характеристик течения, удовлетворительно согласующиеся с различными экспериментальными данными. Вместе с тем пульсационные поля воспроизводятся лишь качественно, так как в модели не учитываются процессы порождения, переноса и диссипации энергии турбулентности.

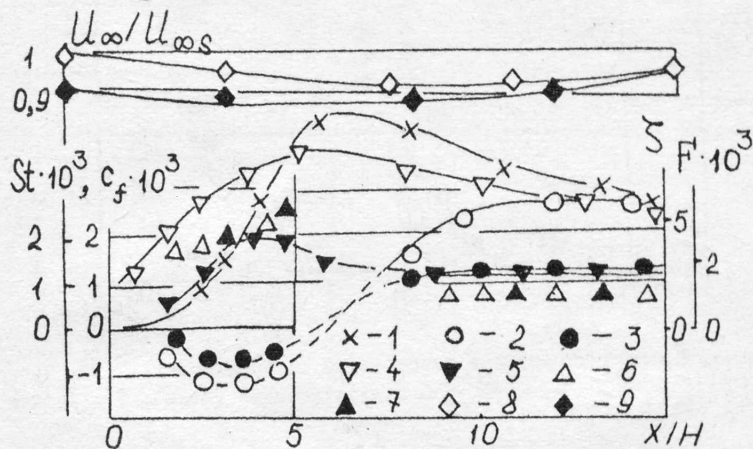


Рис. I. Интегральные характеристики потока: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 - F , c_f , St , ξ , $U_\infty/U_{\infty s}$, $F = 0$ и вдув (темные точки)

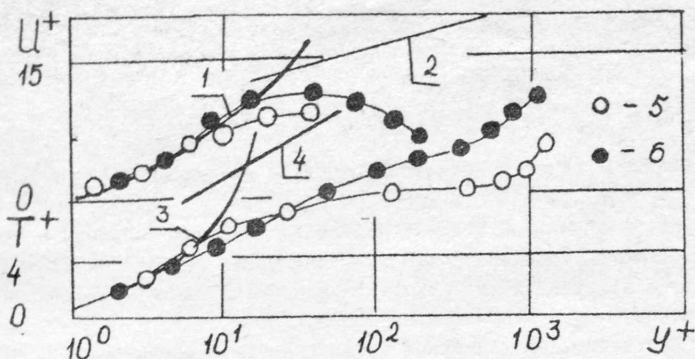


Рис.2. Профили скорости и температуры в переменных закона "стенки": 1 - $U^+ = y^+$; 2 - $U^+ = 5,6 \cdot \lg y^+ + 5,0$; 3 - $T^+ = \rho r \cdot y^+$; 4 - $T^+ = 5 \cdot \lg y^+ + 3,8$; 5, 6 - $U/U_\tau, T/T_\tau, F^+ = 0^*$ и вдув (темные точки, $X/H = 2,5$)

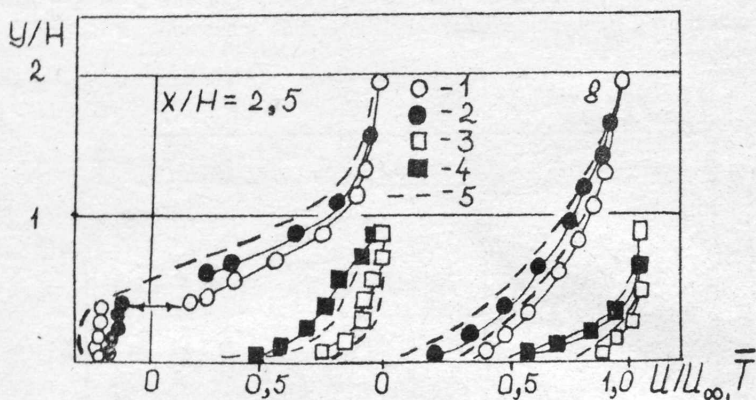


Рис.3. Профили скорости и температуры за уступом: 1, 2, 3, 4 - $U/U_\infty, T/T_\infty, F^+ = 0$ и вдув (темные точки); 5 - расчет

* Грабарник С.Я. Расчет турбулентного теплообмена в рециркуляционной зоне за уступом: Дисс. ... канд.техн.наук: 01.04.14 / МВТУ им. Н.Э.Баумана. - М., 1984. - 190 с.

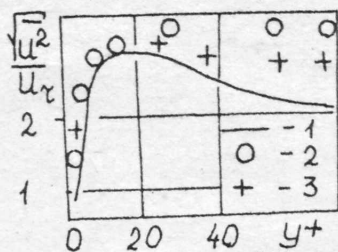


Рис. 4. Распределение $\sqrt{u'^2}/u_\tau$:
I - $dp/dx = 0$; 2, 3 - опытные
данные $-X/H = 2,5$; 8 ($F=0$)

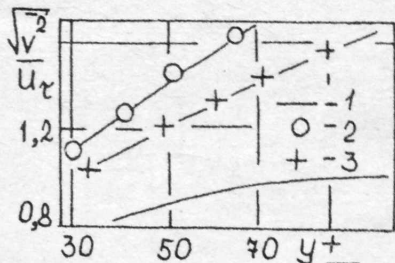


Рис. 5. Распределение $\sqrt{v'^2}/u_\tau$:
I - $dp/dx = 0$; 2, 3 - опытные
данные $-X/H = 2,5$; 8

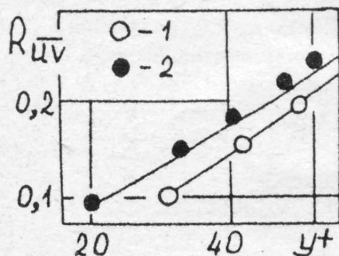


Рис. 6. Распределение R_{uv} :
I, 2 - опытные данные $-F =$
 $= 0$ и вдув ($X/H = 2,5$)

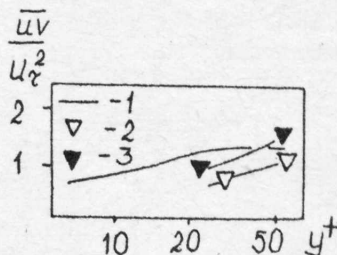


Рис. 7. Распределение $\overline{uv}/u_\tau^2$:
I - $dp/dx = 0$; 2, 3 - опытные
данные, $F = 0$ и вдув ($X/H = 2,5$)

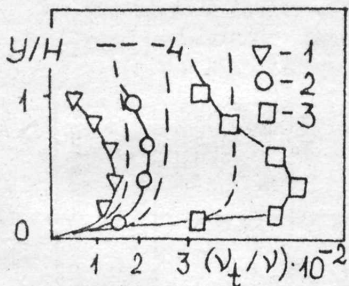


Рис. 8. Распределение турбу-
лентной вязкости: I, 2, 3, -
опытные данные: $X/H = 1,5$;
2,5; 8,0, 4 - расчет

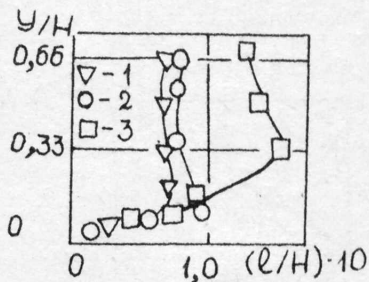


Рис. 9. Распределение длины пу-
ти смещения (обозначения соот-
ветствуют рис.8)

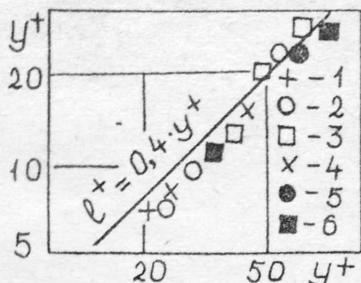


Рис.10. Распределение l^+ ; 1, 2, 3, 4, 5, 6- $X/H = 1,5$; 2,5; 8, 12 - $F = 0$ и вдув (темные точки)

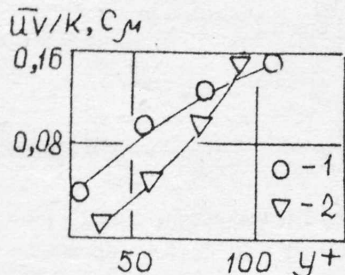


Рис.12. Распределение $\bar{u}v/K$ и C_{μ} : 1- $\bar{u}v/K$; 2- C_{μ} ($X/H = 2,5$ и $F = 0$)

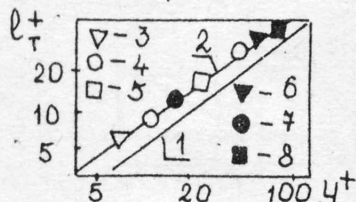


Рис.14. Распределение l^+ : 1- $l^+ = 0,4 y^+$; 2- $l^+ = 0,58 y^+$; 3, 4, 5, 6, 7, 8- $X/H = 1,5$; 2,5; 8 - $F = 0$ и вдув

12

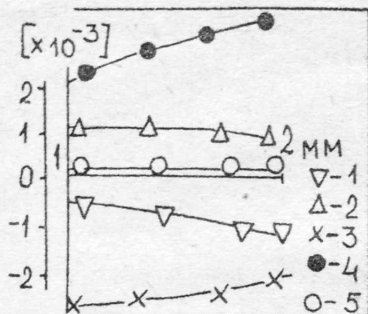


Рис.11. Баланс энергии турбулентности в сечении $X/H = 2,5$: 1- генерация; 2 - конвекция; 3-диффузия; 4-диссипация; 5 - дисбаланс

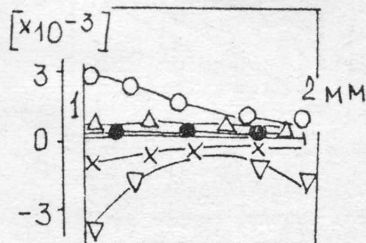


Рис.13. Баланс касательных напряжений (обозначения соответствуют рис.11, $X/H = 2,5$)

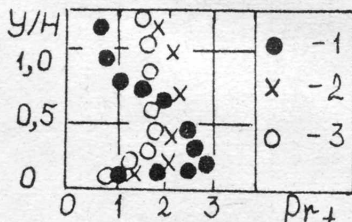


Рис.15. Распределение числа Prt (вдув): 1, 2, 3 - $X/H = 1,5$; 2,5; 8

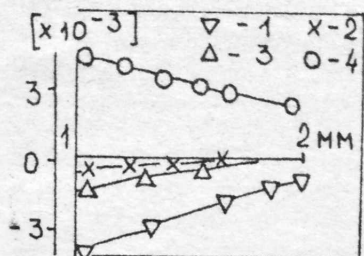


Рис.16. Баланс переноса $V\theta$;
1 - генерация; 2-диффузия;
3-конвекция; 4-дисбаланс

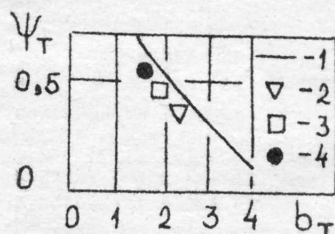


Рис.18. Относительный закон
теплообмена: $1 - \Psi_T = (1 - \tilde{b}_T)^2$;
2, 3, 4 - $X/H = 8, 12, 17$

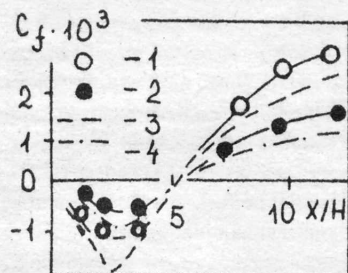


Рис.20. Распределение C_f :
1, 2, 3, 4 - данные настоящего
эксперимента и расчет,
 $F = 0$ и вдув

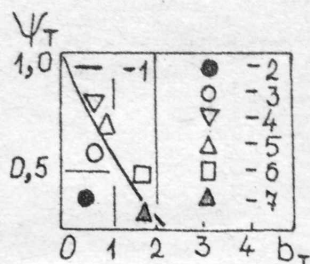


Рис.17. Относительный закон
теплообмена: $1 - \Psi_T = (1 - \tilde{b}_T)^{4/3}$
2, 3, 4, 5, 6, 7 - $X/H = 2,0$;
2, 5; 3,0; 3,5; 4,5; 5,0

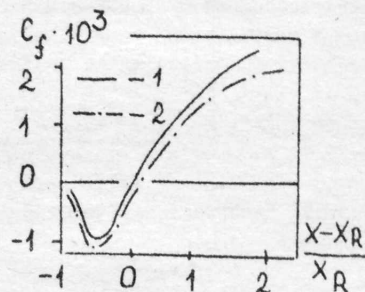


Рис.19. Распределение C_f :
1 - опытные данные Итона^{жж};
2 - расчет

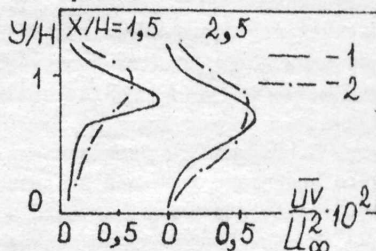


Рис.21. Распределение турбулентных
касательных напряжений
($F = 0$) 1, 2 - опытные дан-
ные и расчет

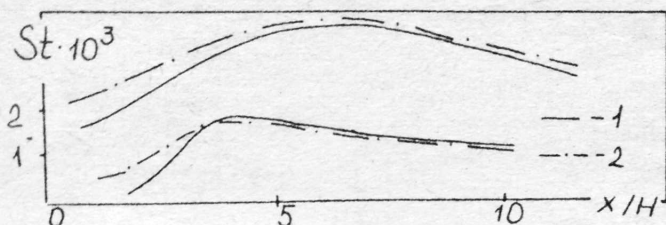


Рис.22. Распределение чисел St : 1, 2 - опытные данные и расчет ($F = 0$ и вдув)

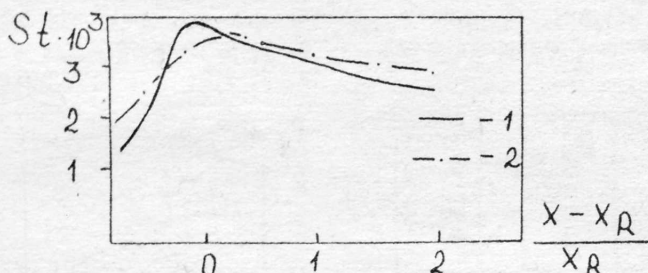


Рис.23. Распределение чисел St : 1, 2 - опытные данные Итона^{***} и расчет

ВЫВОДЫ

1. Подробное экспериментальное исследование структуры гидродинамического и теплового турбулентного потока за уступом при наличии пористого вдува показало, что умеренный вдув приводит к снижению коэффициентов поверхностного трения и статического давления, чисел St и практически не сказывается на длине отрывной зоны.

2. Результаты исследования отдельных составляющих транспортного уравнения переноса энергии турбулентности позволили выявить существенное влияние диффузии и показать возможность аппроксимации диффузии градиентным представлением.

xx

Фогель, Итон. Комбинированные измерения теплоотдачи и гидродинамических характеристик за обратным уступом // Теплопередача.- 1965.- № 4.- С. 152 - 159.

3. Установлено, что умеренный вдув слабо влияет на турбулизацию пристенного течения.

4. Показано, что в области течения с преобладающим влиянием диффузии и скорости диссипации энергии турбулентности выполняются основные допущения, положенные в основу методов расчета и моделей турбулентности, основанных на гипотезах Л.Прандтля и Буссинеска.

5. В результате сравнения экспериментально определенных отдельных составляющих транспортных уравнений переноса $\overline{v\theta}$ и $\overline{uv}$ выявлено подобие в механизмах переноса $\overline{uv}$ и $\overline{v\theta}$, что позволяет построить метод расчета теплообмена, основанный на гипотезе длины пути смешения и понятии турбулентной теплопроводности.

6. Предложен метод расчета, основанный на гипотезах длины пути смешения и понятиях турбулентной вязкости и теплопроводности, который позволяет получить распределения динамических и тепловых характеристик, удовлетворительно согласующиеся с экспериментальными данными.

7. Показано, что в отрывных течениях снижение уровня теплообмена, как в рециркуляционной области, так и в области развития присоединившегося потока при умеренном вдуве можно учесть в рамках интегральной теории пограничного слоя.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

1. Атаян Р.Ш. Исследование тепло и массообмена за ступенькой // Современные проблемы газодинамики и пути повышения эффективности энергетических установок: Тез.докл. VI Всесоюзной школы-семинара. - М., 1987. - С.7.
2. Процессы тепло и массопереноса в отрывной области течения за уступом / Е.В.Шишов, В.П.Заболоцкий, П.С.Роганов, Р.Ш.Атаян. // Совершенствование теории и техники тепловой защиты энергетических установок: Тез.докл. Республиканской конференции. - Киев, 1987. С.13-14.
3. Распределение коэффициентов поверхностного трения и чисел St за обратным уступом при наличии пористого вдува / Е.В.Шишов, П.С.Роганов, В.П.Заболоцкий, Р.Ш.Атаян. // Деп. рук. ВИНТИ. 1987 - № 3063-87В. - 7с.
4. Структура течения за обратным уступом на проникаемой пластине

/ Е.В.Шишов, В.П.Заболоцкий, П.С.Роганов, Р.Ш.Атаян. // Известия ВУЗов. Авиационная техника. - 1987. - № 4. - С.97-98.

5. Процессы турбулентного теплопереноса в потоке за обратным уступом на проницаемой поверхности / Е.В.Шишов, П.С.Роганов, В.П.Заболоцкий, Р.Ш.Атаян. // Теплообмен-ММФ. - Минск, 1988 - Т.1, ч.1. - С.119-121.

Диски

