

М 388848

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ С С С Р



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

На правах рукописи

ЗАБОЛОЦКИЙ ВЛАДИМИР ПЕТРОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ БОЛЬШИХ
ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ГРАДИЕНТАХ ДАВЛЕНИЯ И ВДУВЕ В
ТУРБУЛЕНТНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

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 - 1981 г.

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:

1. Доктор технических наук, профессор Поляев В.М.
2. Кандидат технических наук, с.н.с. Бояринцев В.И.

Ведущее предприятие: Институт Механики
МГУ им. М.В.Ломоносова

Защита диссертации состоится " " 1981 г.
в часов на заседании специализированного совета по энергетическим установкам К.053.15.06, в Московском высшем техническом училище им. Н.Э.Баумана по адресу: г.Москва, 107005, Лефортовская набережная, д.1, факультет "Энергомашиностроение".

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

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просить направлять по адресу: Москва, 107005, 2-ая Лефортовская набережная, ученому секретарю.

_____ 1981 г.

Ганчев Б.Г.

г. тир. 100 экз. Зак.1577

М388848

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Турбулентные потоки основная форма движения жидких и газообразных сред в технологических системах. Повышение эффективности энергетических установок выдвигает требование по повышению точности используемых методов расчета гидродинамических и тепловых характеристик турбулентных течений. Изучение структуры гидродинамического и теплового поля турбулентного пограничного слоя, а также процессов переноса турбулентных характеристик, позволяет глубже познать природу турбулентности и разработать надежные методы расчета теплообмена.

Цель работы. Экспериментально исследовать структуру турбулентных пульсаций скорости и температуры в ускоренном тепловом турбулентном пограничном слое со вдувом. На основании экспериментальных данных по структуре получить распределение составляющих транспортных уравнений переноса энергии турбулентности, касательных напряжений, пульсаций температуры и турбулентного теплового потока, что в свою очередь позволит проверить аппроксимации для транспортных уравнений переноса турбулентных характеристик, уточнить их и создать метод расчета. Проверить метод расчета при различных гидродинамических и тепловых граничных условиях.

Научная новизна. Впервые получены экспериментальные данные по структуре турбулентного теплового пограничного слоя и распределению составляющих транспортных уравнений турбулентности в ускоренном пограничном слое со вдувом.

Практическая ценность. Создана методика расчета теплообмена, верно отражающая физическую сущность явлений и пригодная для использования при различных сложных гидродинамических и тепловых граничных условий.

Реализация. Предложенный в диссертации метод используется при расчете теплообмена в реальных конструкциях.

Апробация работы. Основные результаты исследований докладывались на VI Всесоюзной конференции по тепломассообмену (Минск, 1980); на Всесоюзной школе-семинар "Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках" (Нарва, 1981); на V Всесоюзном съезде по теоретической и прикладной механике (Алма-Ата, 1981); на II Межотраслевой школе по проблемам проектирования конструкций (Душанбе, 1981).



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

Объем работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 5 глав, выводов, содержит 132 страниц машинописного текста, 72 рисунков. Список литературы включает 98 наименования на русском и иностранных языках.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проявляется большой интерес к исследованию влияния сильного ускорения основного потока и вдува на турбулентный пограничный слой. Эти условия имеют место при вдуве охлаждающего газа через пористую поверхность лопаток газовых турбин, в соплах реактивных двигателей и в других энергетических установках. Турбулентное движение представляют в виде некоторой иерархии возмущений и турбулентных образований, переменных в пространстве и времени. Этим обуславливается статистический подход к ее физико-математическому описанию. Последние отечественные и зарубежные экспериментальные работы показывают, что совместное влияние вдува и ускорения может вызвать как снижение, так и возрастание числа St , хотя каждый из этих факторов в отдельности снижает коэффициент теплообмена. Следовательно даже в ограниченных условиях нашего исследования число St нельзя связать с Re_τ^* , с параметром ускорения $K = (v/U_\infty^2) \cdot (dU_\infty/dx)$ и параметром вдува $\beta = V_{\tau}/U_\infty$ (рис. I). Широко применяющиеся в настоящее время дифференциальные методы расчета используют различные соотношения для турбулентного числа Прандтля (Pz_τ) для замыкания уравнения энергии. Для описания распределения величины Pz_τ в сечении турбулентного пограничного слоя используется привлечение экспериментальных данных, задаются различные соотношения для Pz_τ либо даже принимается $Pz_\tau = const$. Однако, имеющиеся экспериментальные данные показывают, что Pz_τ существенно зависит от гидродинамических и тепловых условий. Таким образом практически невозможно задать распределение Pz_τ в пограничном слое со сложными граничными условиями. В работах Б.А.Коловандина, Б.С.Петухова, Б.Е.Лаундера предложено для замыкания уравнения энергии использовать уравнение переноса турбулентного теплового потока. В настоящее время недостаточно сведений по распределению составляющих транспортного уравнения переноса турбулентного теплового потока при сложных граничных условиях, чтобы

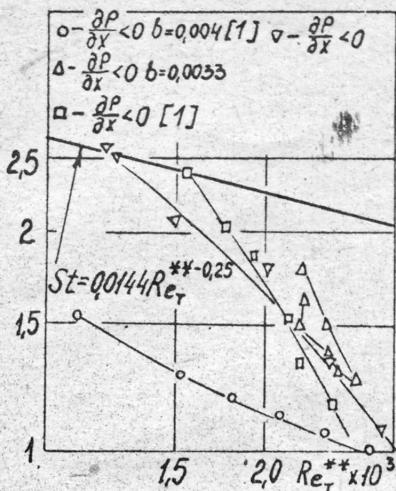
$St \times 10^{-3}$


Рис.1

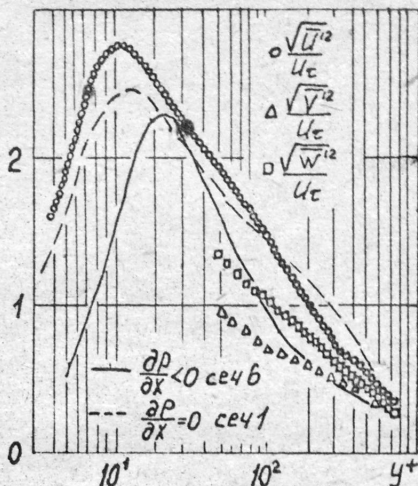


Рис.2

физически обоснованно подойти к моделированию членов уравнения $\sqrt{V' \theta'}$. Кроме того, способность таких моделей прогнозировать в деталях свойства турбулентных течений настолько высока, что не хватает запаса экспериментальных данных, с которыми эти прогнозы можно сравнить, более того прогнозируются величины, которые трудно или невозможно измерить. В настоящее время недостаточно экспериментальных данных по пульсационной структуре турбулентного пограничного слоя, развивающегося под действием больших отрицательных градиентов давления и вдуве, что не позволяет оценить возможности использования дифференциальных моделей турбулентности. В данной работе на основе полученных экспериментальных данных предложен метод расчета, позволяющий получать распределения осредненных и пульсационных характеристик, достаточно хорошо согласующихся с экспериментальными данными для течений с различными гидродинамическими и тепловыми граничными условиями.

I. Kearney D.W., Moffat R.Y., Kays W.M. The turbulent boundary layer experimental heat transfer with strong favorable pressure gradient and blowing. — Report HMT-12, Stanford Univ., 1970. — 205p.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования проводились на дозвуковой аэродинамической трубе открытого типа, работающей на всасывании. Общая длина трубы 10 м, рабочая часть имеет размеры 300х500х3000 мм. Отрицательный градиент давления создавался профилированием гибкой стеклопластиковой задней стенки канала. Экспериментальный участок представляет собой переднюю (боковую) стенку рабочей части аэродинамической трубы. Пористая пластина была изготовлена методом горячего прессования из метилметакрилатного порошка ϕ 50 мкм, размерами 20х500х1700 мм. Пористая пластина состоит из 17 секций, каждая из которых снабжена отдельной системой вдува. В каждую секцию вдоль средней линии заделаны хромелькопелевые термопары ϕ 0,2 мм и трубки статического давления ϕ 0,3 мм. С наружной стороны к каждой пористой секции крепится ресивер, стенки которого выполнены из текстолита. Нагрев пластины осуществлялся за счет вдуваемого воздуха. Параметр вдува $\delta = 0,0033$. Конфигурация канала подбиралась таким образом, чтобы как можно на большей длине получить постоянное значение параметра ускорения потока $K = 2,35 \cdot 10^{-6}$. Измерение средних и пульсационных характеристик проводилось термоанемометрической аппаратурой 55М "ДИСА". Для измерения спектральных характеристик использовался треть-октавный анализатор ТОА-Ш фирмы RFT. В измерениях использовались стандартные одно и двухниточные Х-образные датчики. Используемая методика экспериментального исследования гидродинамических характеристик не отличается от подробно описанной в отечественной и зарубежной литературе. При измерении высокочастотных температурных пульсаций вводилась поправка, обусловленная недостаточным частотным разрешением датчика термоанемометра, работающего в режиме постоянного тока. Используемая методика позволила определить основные пульсационные характеристики со следующими относительными среднеквадратичными погрешностями:

$$\begin{aligned} \eta_u &= \pm 1,35\%; \eta_{u'} = \pm 1,7\%; \eta_T = \pm 0,8\%; \eta_{\delta} = \pm 1,2\%; \eta_{u''} = \pm 1,2\%; \\ \eta_{\overline{u'v'}} &= \pm 9\%; \eta_{\overline{v'\delta}} = \pm 12\%; \eta_{\sqrt{\frac{du'}{dx}}^2} = \pm 3,2\%; \eta_{P_{2T}} = \pm 24\%. \end{aligned}$$

N	X мм	U м/с ΔT_{∞} К	δ мм δ_T мм	δ^{**} мм δ_T^{**} мм	Re^{**} Re_T^{**}	$C_f \times 10^3$ $St \times 10^3$	δ^* мм	H
1	539	6,95	23,8	3,16	1508	2,69	4,97	1,57
		7,2	25,6	4,83	2305	1,87		
2	662	7,25	25,4	3,23	1583	2,90	4,98	1,54
		7,2	25,0	5,0	2490	1,50		
3	747	7,70	22,6	2,76	1402	3,10	4,2	1,52
		7,2	23,7	5,25	2718	1,25		
4	946	9,75	19,8	1,75	1150	3,50	2,46	1,41
		8,8	20,4	3,70	2432	1,27		
5	975	10,25	19,2	1,7	1179	3,51	2,43	1,43
		9,5	20	3,60	2490	1,31		
6	1143	14,23	16,6	1,27	1049	3,63	1,76	1,38
		13,0	18,9	2,20	2199	1,50		
7	1248	19,09	10,1	0,85	1098	3,58	1,26	1,48
		17,2	17,1	1,75	2251	1,60		

Результаты экспериментальных исследований

Основные параметры и интегральные характеристики сильно ускоренного турбулентного пограничного слоя со вдувом приведены в таблице I. Основные измерения проводились в сечении 6. Для наглядности влияния вдува экспериментальные данные приводятся в сравнении с данными турбулентного пограничного слоя при том же параметре ускорения $K = 2,35 \cdot 10^{-6}$, но без вдува, а также с классическими данными при безградиентном обтекании пластины. На рис. 2 представлены пульсации скорости в координатах стенки, где видно, что под действием отрицательного градиента давления заметно увеличилась толщина вязкого подслоя по сравнению со случаем безградиентного обтекания, в то время как при вдуве с отрицательным градиентом давления толщина вязкого подслоя стано-

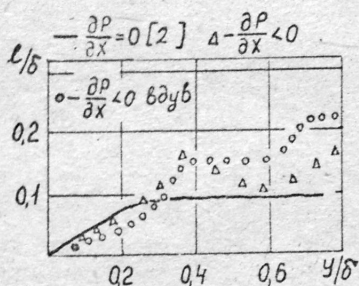


Рис.3

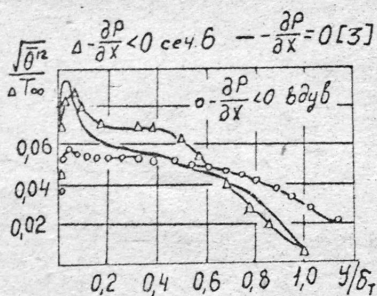


Рис.4

новится меньше даже по сравнению со случаем безградиентного обтекания пластины. На рис.3 представлено распределение длины "пути смещения". В пристенной области хотя и сохраняется пропорциональность l расстоянию до стенки, контента Кармана χ заметно меньше чем при безградиентном обтекании пластины. Довольно сложный характер изменения длины "пути смещения", показывает о неприменимости моделей основанных на длине "пути смещения" которые задаются в виде алгебраических функций. Линейный масштаб при этом нельзя считать универсальным алгебраическим соотношением, а его задание следует связывать с граничными условиями, поэтому для него используется дифференциальное уравнение. Далее на рис.4 представлены распределение пульсаций температуры при трех различных граничных условиях. Видно что пульсации температуры при отрицательном градиенте давления со вдувом практически постоянны по сечению пограничного слоя и величина их гораздо ниже, чем в остальных двух случаях. Низкий уровень пульсаций температуры можно объяснить малой величиной скорости порождения под действием градиента температуры, что следует из анализа уравнения переноса θ^2 . С точки зрения выяснения механизма взаимодействия пульсационного и осредненного движения большой интерес имеет исследование энергетических спектров турбулентных пульсаций скорости и

2. Bradshaw P., Ferris D. The Response of a retarded equilibrium turbulent boundary layer to the sudden removal of pressure gradient. - NPL Aero Report II45, 1965. - 20p.

3. Белов В.М. Экспериментальное исследование теплообмена в турбулентном пограничном слое при ступенчатом изменении тепловых граничных условий на стенке. - Дис. ...канд.тех.наук. - Москва, 1975, - 146 с.

температуры.

На рис.5 представлены спектральные функции различных пульсационных характеристик, позволяющие наглядно определить вклад пульсаций в различных диапазонах волновых чисел. Область волновых чисел, характеризующаяся интенсивным взаимодействием осредненного и пульсационного движения, имеет угловой коэффициент K^{-1} . Следовательно, область с законом затухания K^{-1} будет выглядеть как отрезок параллельный оси абсцисс. Спектральная функция $K \cdot F_u(k)$ во внешней области потока имеет площадку значительной протяженности, расположенную в области энергосодержащих вихрей. Возникновение этой площадки, по-видимому, связано с тем, что по мере прекращения процесса вовлечения натурбулентной жидкости в пограничный слой интенсивность вновь возникающих крупномасштабных вихревых структур резко падает, в то время как интенсивность высокочастотных пульсаций возрастает за счет разрушения более интенсивных вихрей наибольших размеров, возникающих вверх по потоку.

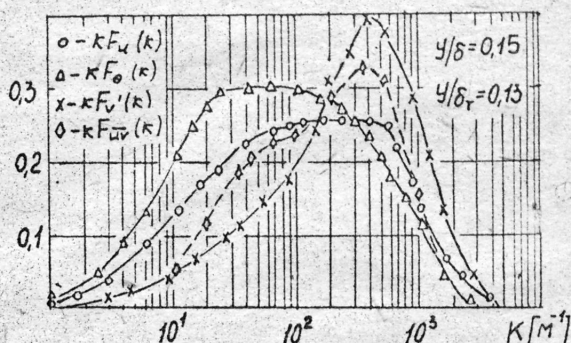


Рис.5. Нормированные спектральные функции.

Транспортные уравнения турбулентности

При разработке моделей турбулентности часто используют транспортные уравнения турбулентности. Однако в настоящее время практически мало экспериментальных исследований составляющих уравнения баланса при сложных граничных условиях.

В данной работе подробно исследованы составляющие баланса энергии турбулентности, касательного напряжения, пульсаций температуры и турбулентного теплового потока.

Транспортное уравнение для касательного напряжения в слу-

чае двумерного пограничного слоя имеет вид:

$$U \cdot \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial x} + V \cdot \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} + \overline{v'^2} \cdot \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \cdot (\overline{v'^2} U') = \\ = \overline{u' \frac{\partial p}{\partial y}} + \overline{v' \frac{\partial p}{\partial x}} + 6 \cdot \overline{v' \left(\frac{\partial u'}{\partial x} \cdot \frac{\partial v'}{\partial y} \right)} \quad (1)$$

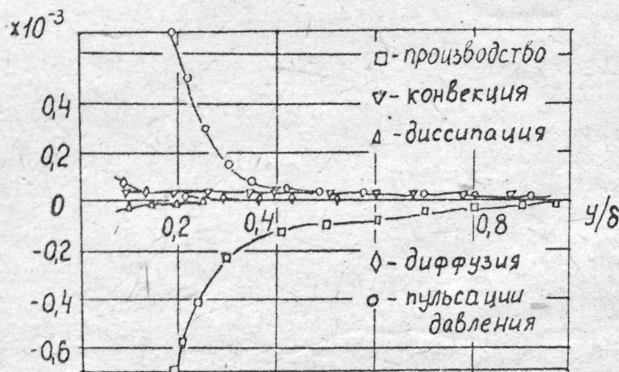


Рис. 6. Баланс касательного напряжения $\overline{u'v'}$.

Экспериментальное распределение составляющих баланса касательного напряжения, приведенное к безразмерному виду с помощью масштабов δ и U_∞ , в сечении исследуемого пограничного слоя показаны на рис. 6. Видно, что основную роль играют порождение касательного напряжения и члены содержащие пульсации давления. Таким образом в данных условиях модель турбулентной вязкости, полученная из уравнения $\overline{u'v'}$ в пренебрежении конвективных и диффузионных членов, должна дать хорошие результаты.

Уравнение баланса кинетической энергии турбулентности в случае двумерного турбулентного пограничного слоя имеет вид:

$$U \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + V \frac{\partial \epsilon}{\partial y} = -\overline{u'v'} - (\overline{u'^2} - \overline{v'^2}) \cdot \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\overline{p'v'}}{\rho} + \overline{\epsilon v'} \right) + \epsilon \quad (2)$$

На рис. 7 представлено распределение составляющих баланса кинетической энергии турбулентности приведенное к безразмерному виду с помощью масштабов δ и U_∞ , качественно баланс мало отличается от случая $\partial p / \partial x = 0$.

Уравнение баланса турбулентного теплового потока в случае двумерного пограничного слоя имеет вид:

$$U \frac{\partial \overline{v'\theta'}}{\partial x} + V \frac{\partial \overline{v'\theta'}}{\partial y} = -(\overline{u'v'} \frac{\partial T}{\partial x} + \overline{v'^2} \frac{\partial T}{\partial y}) - (\overline{u'\theta'} \frac{\partial V}{\partial x} + \overline{v'\theta'} \frac{\partial V}{\partial y}) -$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{\theta' p'}}{\partial y} - \left(\frac{\partial \overline{u' v' \theta'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v' v' \theta'}}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \overline{p' \frac{\partial \theta'}{\partial y}} \right) \quad (3)$$

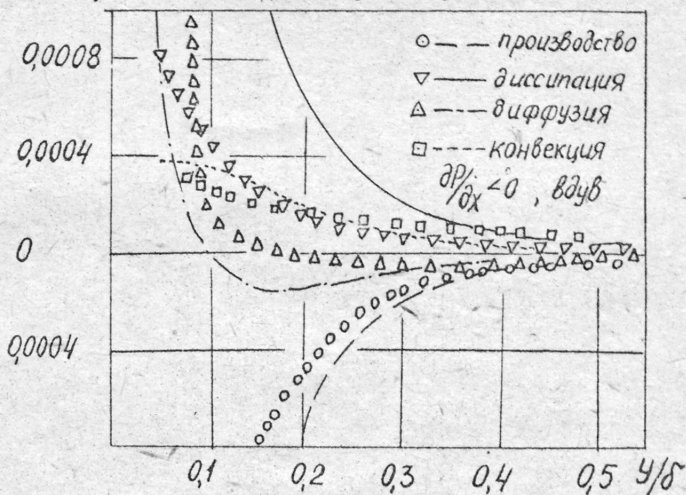


Рис. 7 Баланс энергии турбулентности.

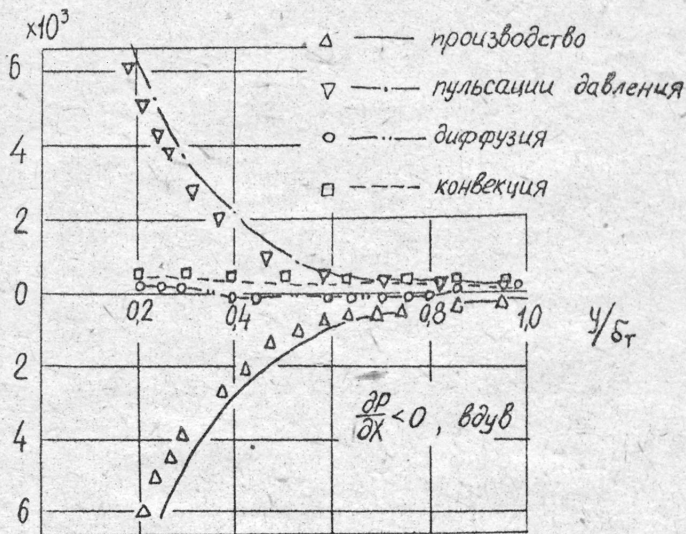


Рис. 8 Баланс турбулентного теплового потока.

Экспериментально полученные составляющие баланса турбулентного теплового потока, приведенные к безразмерному виду с помощью масштабов $U_T, \delta_T, \Delta T_\infty$ показаны на рис.8. Полученные экспериментальные данные позволили смоделировать транспортное уравнение $\overline{v'\theta'}$ и проверить справедливость аппроксимаций.

Расчет турбулентного пограничного слоя

На основе анализа моделей турбулентности и экспериментальных данных приведенных в данной работе была выбрана двух параметрическая модель "e- ϵ " дополненная членом учитывающий нормальные составляющих пульсаций скорости, а также дополненная смоделированным уравнением переноса турбулентного теплового потока. Для того чтобы оценить пределы применимости модели "e- ϵ " были проведены расчеты пограничных слоев, исследованных другими авторами.

Система уравнений (4) - (9) решалась со следующими граничными условиями:

$$y=0 \Rightarrow U=\epsilon=e=\overline{v'\theta'}=0, \quad V=V_{cr}(x), \quad T=T_{cr}(x);$$

$$y=\infty \Rightarrow \frac{\partial U}{\partial y} = \frac{\partial e}{\partial y} = \frac{\partial \epsilon}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial \overline{v'\theta'}}{\partial y} = 0.$$

В качестве начальных условий задавались экспериментальные профили скорости, температуры и турбулентного теплового потока. Начальные распределения энергии турбулентности и скорости диссипации определялись по известному профилю скорости в следующем виде:

$$e = 3,33 \cdot (\ell_\epsilon \cdot \frac{\partial U}{\partial y})^2; \quad \epsilon = 0,164 \cdot e^{3/2} / \ell_\epsilon;$$

$$\ell_\epsilon = 0,4 \cdot y \quad (y \leq 0,28); \quad \ell_\epsilon = 0,09 \cdot \delta \quad (y > 0,28)$$

Система исходных дифференциальных уравнений параболического типа второго порядка с граничными условиями решалась методом конечных разностей с использованием неявной двухслойной шеститочечной схемы. Из-за наличия максимальных градиентов турбулентных параметров в пристеночной области, чтобы обеспечить необходимую точность вычисления, требуется ввести неравномерную расчетную сетку поперек турбулентного пограничного слоя. Была произведена тангенсная замена переменных по y . Максимальное количество узлов сетки в поперечном сечении пограничного слоя выбиралась равным 120, около 40% которых располагалось в 10% пограничного слоя, прилегающего к стенке.

$$\rho \cdot U \frac{\partial U}{\partial X} + \rho \cdot V \frac{\partial U}{\partial Y} = - \frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\partial}{\partial Y} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial U}{\partial Y} \right]; \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho U}{\partial X} + \frac{\partial \rho V}{\partial Y} = 0; \quad (5)$$

$$\rho U \frac{\partial e}{\partial X} + \rho V \frac{\partial e}{\partial Y} = \frac{\partial}{\partial Y} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial e}{\partial Y} \right] + \mu_t \left(\frac{\partial U}{\partial Y} \right)^2 - 0,5 \cdot \rho \cdot e \frac{\partial U}{\partial X} - \rho \cdot \varepsilon - 2 \cdot \mu \left(\frac{\partial e}{\partial Y} \right)^2; \quad (6)$$

$$\rho \cdot U \frac{\partial \varepsilon}{\partial X} + \rho \cdot V \frac{\partial \varepsilon}{\partial Y} = \frac{\partial}{\partial Y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{1,3} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial Y} \right] + 1,55 \frac{\varepsilon}{e} \left[\mu_t \left(\frac{\partial U}{\partial Y} \right)^2 - 0,5 \rho \cdot e \frac{\partial U}{\partial X} \right] - 2 C_\varepsilon \rho \frac{\varepsilon^2}{e} + 2 \mu \mu_t \left(\frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right)^2; \quad (7)$$

$$C_p \rho \left(U \frac{\partial T}{\partial X} + V \frac{\partial T}{\partial Y} \right) = U \frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\partial}{\partial Y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial Y} - \rho \cdot C_p \overline{v' \theta'} \right) + \mu \left(\frac{\partial U}{\partial Y} \right)^2 + \rho \cdot \varepsilon; \quad (8)$$

$$\rho \cdot U \frac{\partial \overline{v' \theta'}}{\partial X} + \rho \cdot V \frac{\partial \overline{v' \theta'}}{\partial Y} = - \rho \left(\overline{u' v'} \frac{\partial T}{\partial X} + 1,6 \overline{u' v'} \frac{\partial T}{\partial Y} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \mu_t \right) \frac{\partial \overline{v' \theta'}}{\partial Y} \right] - 3,8 \cdot \rho \frac{\overline{v' \theta'}}{e} \cdot \varepsilon - 0,3 \rho \overline{v' \theta'} \frac{e^{1/2}}{Y} + 0,065 \rho \frac{\overline{u' v'} \cdot e}{\varepsilon} \cdot \frac{\partial T}{\partial Y} \cdot \frac{\partial U}{\partial Y} - 0,035 \rho \frac{\overline{v' \theta'} \cdot e}{\varepsilon} \cdot \left(\frac{\partial U}{\partial Y} \right)^2; \quad (9)$$

$$\mu_t = C_\mu \cdot \rho \cdot \frac{e^2}{\varepsilon}; \quad C_\mu = 0,09 \exp \left(- \frac{2,5}{1 + Re_t / 50} \right);$$

$$C_\varepsilon = 1 - 0,3 \exp \left(- Re_t^2 \right).$$

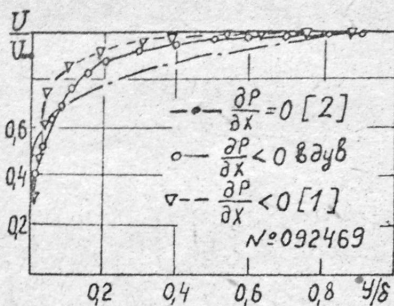


Рис.9

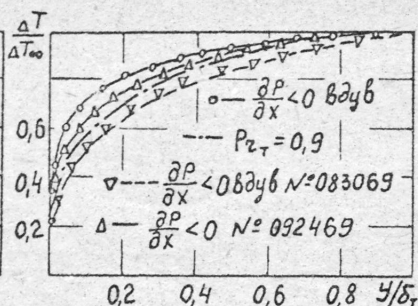


Рис.10

На рис.7 сравниваются расчетные составляющие баланса энергии турбулентности с экспериментом. Количественное несовпадение расчетного значения диссипации с экспериментальным, указывает на необходимость более детального изучения механизма диссипации. На рис.8 сравниваются расчетные составляющие баланса турбулентного теплового потока с экспериментальными данными. Видно, что аппроксимации составляющих баланса турбулентного теплового потока были подобраны верно. На рис. 9-10 представлены расчетные значения профилей скорости и температуры в сравнении с экспериментальными. Для сравнения здесь приводится профиль температуры рассчитанный при постоянном Прандтле турбулентном равном $P_{zT} = 0.9$. Видно, что необходимо применять транспортное уравнение $\nabla^2 \theta$. Здесь же приводятся сравнение расчетных значений профилей с экспериментальными данными других авторов при различных граничных условиях. На рис.11 сравниваются расчетные значения числа St с экспериментальными при различных граничных условиях. На рис. 11-12 приводятся расчетные значения турбулентного теплового потока и числа P_{zT} для безградиентного обтекания пластины, ускоренного турбулентного пограничного слоя и ускоренного пограничного слоя со вдувом. Видно, что число P_{zT} имеет довольно сложную зависимость поперек турбулентного пограничного слоя, поэтому его необходимо рассчитывать. Таким образом сравнение результатов расчета с экспериментальными распределениями средних и пульсационных характеристик турбулентного пограничного слоя, развивающегося при

4. Orlando A.F., Moffat R.J., Kays W.M. Turbulent transport of heat and momentum in a boundary layer subject to deceleration, suction and variable wall temperature. - Report HMT-17, Stanford University, 1974. - 205p.

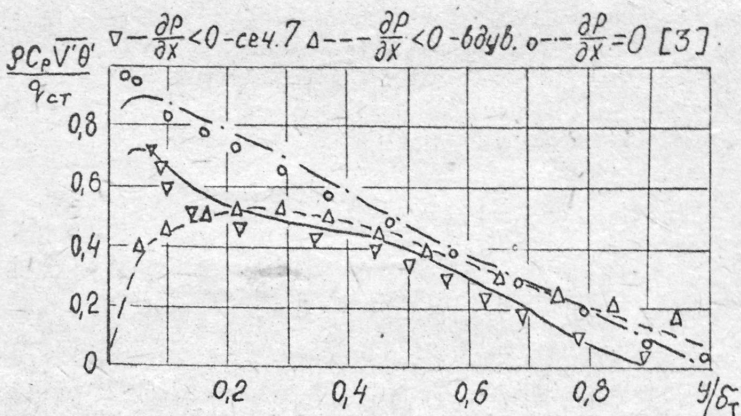


Рис. II Расчет турбулентного теплового потока.

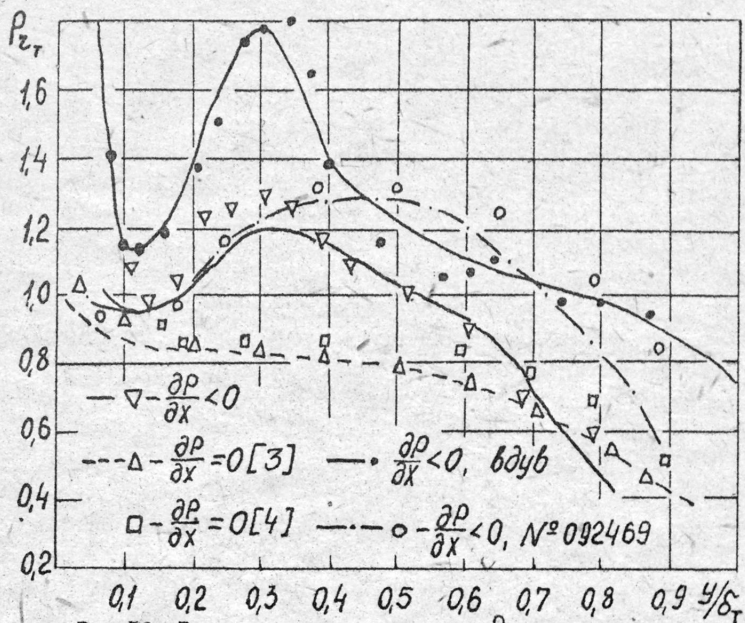


Рис. I2 Расчетные значения числа P_{τ_T} .

различных граничных условиях свидетельствует о том, что предложенная модель "е-ε" с уравнением переноса $\sqrt{v' \theta'}$ с достаточной точностью воспроизводит распределение характеристик гидродинамического и теплового турбулентного пограничного слоя в рассматриваемых условиях и может быть использована для практических расчетов.

ВЫВОДЫ

1. Подробно исследована структура гидродинамического и теплового турбулентного пограничного слоя, развивающегося в конфужной области течения со вдувом.

2. Впервые получено распределение основных составляющих балансов энергии турбулентности, касательного напряжения, пульсаций температуры и турбулентного теплового потока в указанных условиях.

3. Воздействие отрицательного продольного градиента давления на турбулентный пограничный слой приводит к увеличению коэффициента трения C_f и возрастанию толщины вязкого подслоя, что в свою очередь вызывает падение St .

4. Турбулизирующее воздействие вдува приводит к ослаблению эффектов вызванных отрицательным градиентом давления.

5. Характер распределения $P_{\Sigma T}$ в сечении существенно зависит от граничных условий.

6. При расчетах неизотермических пристеночных течений со сложными граничными условиями для замыкания уравнения энергии необходимо использовать транспортное уравнение турбулентного теплового потока.

7. Предложенный метод расчета неизотермических турбулентных пристеночных течений позволяет получать результаты хорошо согласующиеся с экспериментальными данными в областях изменения параметра ускорения $0 \leq K \leq 2,4 \cdot 10^{-6}$ и параметра вдува $0 \leq b \leq 0,004$.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Леонтьев А.И., Шишов Е.В., Афанасьев В.Н., Заболоцкий В.П. Исследование пульсационной структуры теплового турбулентного пограничного слоя в условиях ламинизации потока. - В сб.: Труды 6-ой Всесоюзной конференции по тепломассообмену, - Минск, т. I, часть 2, 1980, с.136-146.

2. Белов В.М., Заболоцкий В.П., Шишов Е.В. Экспериментальное исследование структуры теплового и динамического ускоряющегося турбулентного пограничного слоя. Аннотация докладов: У Всесоюзный съезд по теоретической и прикладной механике. - Алма-Ата, Наука. Каз.ССР, 1981, с.54-55.
3. Белов В.М., Роганов П.С., Заболоцкий В.П. Исследование процессов переноса тепла и импульса в ускоряющемся турбулентном пограничном слое. Тезисы докладов: П Межотраслевая школа по проблемам проектирования конструкций. - Душанбе, 1981, с.35-36.
4. Заболоцкий В.П., Роганов П.С., Белов В.М. Исследование процессов переноса тепла в турбулентном пограничном слое. Тезисы докладов: П Межотраслевая школа по проблемам проектирования конструкций. - Душанбе, 1981, с.36-37.
5. Роганов П.С., Белов В.М., Заболоцкий В.П. Исследование процессов турбулентного течения в ускоряющихся потоках на проницаемых поверхностях. Тезисы докладов: П Межотраслевая школа по проблемам проектирования конструкций. - Душанбе, 1981, с.37-38.