

УДК 536.25

## ТУРБУЛЕНТНАЯ ЕСТЕСТВЕННАЯ КОНВЕКЦИЯ У ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ

*С. С. Кутателадзе, А. Г. Курдяшкин, В. П. Ивакин*

Приводятся результаты экспериментальных исследований структуры турбулентного теплового пограничного слоя вблизи вертикальной пластины при естественной конвекции (корреляционные и спектральные функции по толщине пограничного слоя). Показано, что вблизи стенки интенсивность пульсаций температуры монотонно возрастает до своего наибольшего значения, температура линейно изменяется до координаты, наблюдается смещение максимума дисперсии к стенке с увеличением высоты, временной масштаб турбулентности одинаков по толщине слоя.

Несмотря на то, что свободная тепловая конвекция является одной из старейших проблем физики, систематическое изучение структуры турбулентного пограничного слоя в этих условиях, по существу, только начинается.

Так, в [1] указывается на существенное отличие интенсивности и масштаба турбулентных пульсаций в пограничных слоях при свободно конвективном и вынужденном течениях. Однако методические недостатки экспериментальных исследований и отсутствие статистического анализа полученных экспериментальных данных привели авторов [1] к некорректному выводу о постоянстве интенсивности пульсаций по толщине слоя.

В [2] представлены экспериментальные профили интенсивности пульсаций скорости, монотонно растущие от нуля на стенке до максимальной величины в области максимума скорости.

В данном исследовании проведены температурные измерения в турбулентном пограничном слое при естественной конвекции. Результаты экспериментов обработаны на ЭЦВМ для получения автокорреляционных функций и спектральных плотностей пульсации температуры.

Экспериментальная установка состоит из контейнера с двумя прозрачными стенками размером  $900 \times 150 \times 110$  мм. В контейнер помещается рабочая пластинка, представляющая собой медный теплообменник размерами  $450 \times 80 \times 20$  мм.

Температура поверхности измерялась четырьмя термopарами из никрома-константана диаметром 0,2 мм, расположенными на разных высотах. Постоянство температуры поверхности теплообмена обеспечивалось циркулирующей в полости теплообменника термостатированной водой.

Градиент температуры по высоте пластины составлял  $10^{-1}$  °C/мм.

Пограничный слой, развивающийся на пластине, ограничивался с одной стороны фронтальным стеклом контейнера, с другой — пластиной из органического стекла.

Для поддержания в объеме постоянной температуры в верхней части установки помещался холодильник, постоянная температура которого поддерживалась термостатированной водой.

Температура рабочей жидкости (этилового спирта) в объеме была одинакова по высоте и неизменна по времени. Измерения температур в погра-

ническом слое проводились микротермопарой из меди и константана диаметром 0,06 мм. Координата спаия термопары определялась микроскопом МИР-12 с точностью 0,01 мм, координата стенки — с точностью 0,05 мм.

Низкочастотные пульсации температуры в турбулентном пограничном слое требовали большого времени осреднения, это определило методику измерения температуры.

Сигнал термопары посылается на потенциометр Р-308.

Часть постоянной составляющей э.д.с. термопары компенсировалась на потенциометре, некомпенсированная часть сигнала записывалась на ЭПП-09 либо усиливалась и записывалась шлейфовым осциллографом Н-700. На выходе усилителя устанавливался фильтр нижних частот с ча-

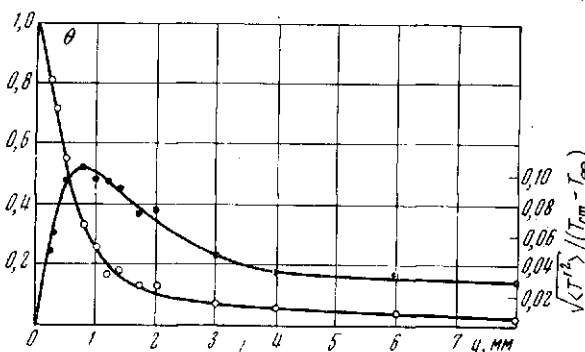


Рис. 1. Профили средней температуры и интенсивности пульсаций температуры,  $\theta = (T - T_{\infty}) / (T_{ст} - T_{\infty})$ ;

$$Ra = 5,24 \cdot 10^{10}, \quad x = 381 \text{ мм}, \\ \Delta T = 11,8^{\circ} \text{С}$$

стотой среза 30 гц. Усилитель, применяемый в эксперименте, усиливал без искажения сигнал частотой от 0 до 150 гц, вибраторы шлейфового осциллографа имели полосу пропускания от 0 до 150 гц. Постоянная времени термопары, рассчитанная для бесконечного цилиндра из константана в потоке этилового спирта ( $u = 20 \text{ мм/сек}$ ), составляет  $5,6 \cdot 10^{-3} \text{ сек}$  [3, 4].

Таким образом, частотные характеристики элементов измерительной схемы соответствовали исследуемому процессу. Перед каждой записью процесса записывались нулевой сигнал, масштаб. Запись измерений проводилась в течение 40—60 сек на осциллографную бумагу, скорость протяжки которой контролировалась отметчиком времени П-104.

Для анализа записанного сигнала на ЭЦВМ предварительно проводился перевод непрерывной осциллографной записи в дискретный числовой код на аналого-цифровом преобразователе «Силуэт» с временным интервалом  $\Delta t = 0,033 \text{ сек}$ . Временной интервал ограничивает наивысшую частоту, на которой можно получить оценку энергетического спектра. Последняя определяется по формуле  $f_N = 1/2\Delta t$ . При выбранном шаге это составляет 15 гц, что много больше рабочей полосы частот. Полученные числовые массивы анализировались на ЭЦВМ.

Алгоритм программы включает в себя следующие операции [5]:

1. Вычисление средней температуры

$$t_{cp} = \sum_{i=1}^n t_i \cdot n^{-1}.$$

2. Вычисление пульсации температуры

$$t_i' = t_i - t_{cp}.$$

3. Вычисление экспериментальных коэффициентов автокорреляции

$$R_{\lambda} = \frac{1}{n - \lambda} \sum_{i=1}^{i=n-\lambda} t_i' t_{i-\lambda}' \quad \text{для } \lambda = 0, 1, \dots, m, \\ \text{где } m < n.$$

4. Вычисление Фурье-преобразования от  $R_\lambda$

$$P_\lambda = \Delta\tau \left[ R_0 + 2 \sum_{i=1}^{i=m-1} R_i \cos \frac{i\lambda\pi}{m} + R_m \cos \lambda\pi \right].$$

5. Вычисление оценок энергетического спектра

$$\begin{aligned} S_0 &= 0,5P_0 + 0,5P_1, \\ S_\lambda &= 0,25P_{\lambda-1} + 0,5P_\lambda + \\ &+ 0,25P_{\lambda+1}, \quad 1 \leq \lambda \leq m-1, \\ S_m &= 0,5P_{m-1} + 0,5P_m. \end{aligned}$$

Полученные значения относятся к частотам  $f_\lambda = \lambda / 2m\Delta\tau$ .

На рис. 1 представлены профили средней температуры и интенсивности пульсации температуры, нормированные по  $\Delta T = T_{ст} - T_\infty$ .

По характеру изменения среднеквадратичного значения пульсаций температуры тепловой пограничный слой можно разделить на три области: непосредственно пристенный слой, характеризующийся линейным профилем средней температуры и монотонным ростом интенсивности пульсаций; область интенсивного теплообмена, где интенсивность пульсаций составляет значительную часть общего перепада температуры; внешняя часть пограничного слоя с небольшой величиной избыточной средней температуры и с существенной перемежаемостью.

На рис. 2 представлены профили дисперсии пульсаций температуры для двух высот  $x_1 = 266$  мм и  $x_2 = 381$  мм при одинаковом перепаде температур. Наблюдается смещение максимума дисперсии к стенке с увеличением высоты.

На рис. 3 приведены автокорреляционные функции для двух областей температур пограничного слоя вблизи стенки и в области интенсивных пульсаций температур.

По изменению автокорреляционной функции в области  $\tau \rightarrow 0$  определялся микромасштаб температурных возмущений.

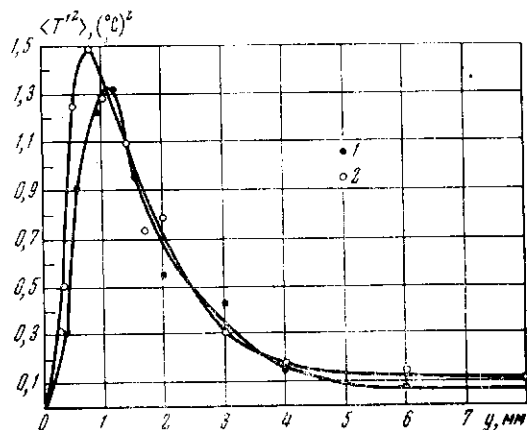


Рис. 2. Профили дисперсии пульсаций температуры:

1 —  $Ra = 1,75 \cdot 10^{10}$ ,  $x = 266$  мм,  $\Delta T = 11,35^\circ\text{C}$ ; 2 —  $Ra = 5,24 \cdot 10^{10}$ ,  $x = 381$  мм,  $\Delta T = 11,6^\circ\text{C}$

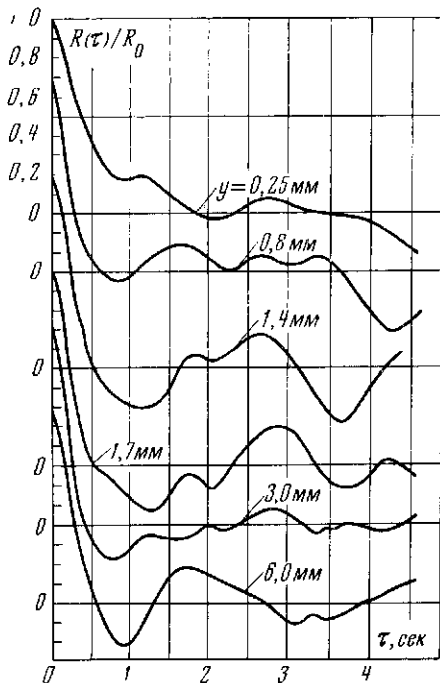


Рис. 3. Автокорреляционные функции по толщине пограничного слоя:

$Ra = 5,24 \cdot 10^{10}$ ,  $x = 381$  мм,  $\Delta T = 11,6^\circ\text{C}$

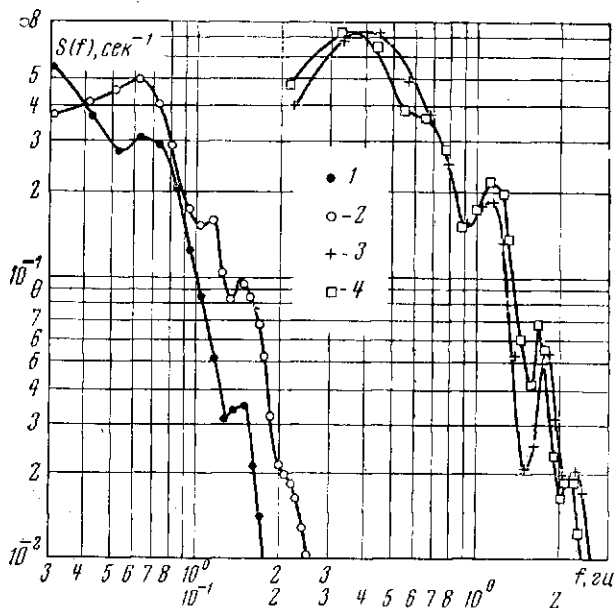


Рис. 4. Спектральная плотность пульсаций температуры в турбулентном пограничном слое ( $Ra = 5,24 \cdot 10^{10}$ ,  $x = 381$  мм,  $\Delta T = 11,6^\circ C$ ):  
1 —  $y = 0,25$  мм; 2 — 0,8; 3 — 1,4; 4 — 1,7

По автокорреляционным функциям рассчитаны микромасштаб ( $\tau_e$ ) и интегральный ( $\mathcal{T}$ ) масштабы времени:  $\mathcal{T} = \int_0^{\tau_0} R_\tau d\tau$ , где  $\tau_0$  — значение сдвига, при котором впервые  $R_\tau$  обращается в нуль.

В таблице приведены значения интегрального масштаба ( $\mathcal{T}$ ) и микромасштаба ( $\tau_e$ ) температурных возмущений по толщине пограничного слоя.

Интегральный масштаб и микромасштаб температурных возмущений по толщине пограничного слоя при  $Ra = 5,24 \cdot 10^{10}$ ,  $x = 381$  мм,  $\Delta T = 11,6^\circ C$

$y$ , мм	0,25	0,8	1,4	1,7	3,0	6,0
$\mathcal{T}$ , сек	0,57	0,23	0,27	0,22	0,16	0,21
$\tau_e$ , сек	0,33	0,25	0,22	0,24	0,165	0,190

Согласно таблице микромасштаб и интегральный масштаб температурных возмущений при свободной конвекции имеют близкие значения. Это является характерным для естественно конвективного течения. В вынужденных же потоках интегральный масштаб на порядок больше микромасштаба. Автокорреляционные функции имеют существенно колебательный характер, что говорит о наличии периодических колебаний температуры.

По представленным автокорреляционным функциям сделаны оценки спектральных плотностей пульсации температуры (рис. 4), которые описывают вклад в дисперсию пульсации температуры от различных частот.

Демпфирующее действие стенки проявляется в сдвиге спектра температурных пульсаций в низкочастотную область по мере приближения к стенке.

Распределение коэффициента перемежаемости в тепловом пограничном слое при турбулентной свободной конвекции на вертикальной поверхности представлено на рис. 5.

Как видно из рис. 5, в пристенной области коэффициент перемежаемости равен 1, т. е. течение все время остается турбулентным.

По мере увеличения расстояния от стенки турбулентность носит перемежающийся характер. С возрастанием высоты наблюдается более плавное уменьшение коэффициента перемежаемости во внешней части пограничного слоя.

Таким образом, температурные измерения показали, что вблизи стенки существует область, где интенсивность пульсации температуры монотонно возрастает до своего наибольшего значения и температура линейно изменяется от координаты, что характерно для теплового слоя в вязком подслое. Из анализа автокорреляционных функций следует, что масштаб турбулентности в свободно конвективном пограничном слое у вертикальной изотермической пластины одинаков по толщине слоя.

**Обозначения:**  $x$  — продольная координата, мм;  $y$  — поперечная координата, мм;  $T_{ст}$  — температура пластины, °C;  $T_{\infty}$  — температура в объеме жидкости, °C;  $t_h$  — температура, соответствующая значению термо-э.д.с., скомпенсированной на P-308, °C;  $t_{ср}$  — средняя величина нескомпенсированной части температуры, °C;  $T = t_{ср} + t_h$  — средняя температура жидкости, °C;  $t$  — мгновенное значение нескомпенсированной части температуры, °C;  $t'$  — пульсирующая составляющая температуры, °C;  $\langle t'^2 \rangle$  — дисперсия пульсации температуры, °C<sup>2</sup>;  $n$  — количество закодированных значений температуры, соответствующее времени записи —  $t_{зап}$ ;  $\Delta t$  — временной сдвиг, сек;  $m\Delta t$  — максимальный временной сдвиг, сек;  $f_N$  — частота Найквиста,  $гц$ ;  $R_A$  — автокорреляционный коэффициент, °C<sup>2</sup>;  $P_A$  — фурье-преобразование  $R_A$ ;  $S$  — оценка энергетического спектра температурных возмущений,  $сек^{-1}$ ;  $\tau_e$  — микромасштаб температурных возмущений, сек;  $\mathcal{T}$  — интегральный временной масштаб температурных возмущений, сек;  $\varphi = \tau_{турб} / \tau_{зап}$  — коэффициент перемежаемости;  $Pr = \nu / a$  — число Прандтля, принимается по средней температуре пограничного слоя  $T_{ср} = (T_{ст} + T_{\infty}) / 2$ ;  $Ra = (\beta g / \nu a) \Delta T x^3$  — число Рэлея, физические свойства приняты по средней температуре пограничного слоя,  $T_{ср} = (T_{ст} + T_{\infty}) / 2$ .

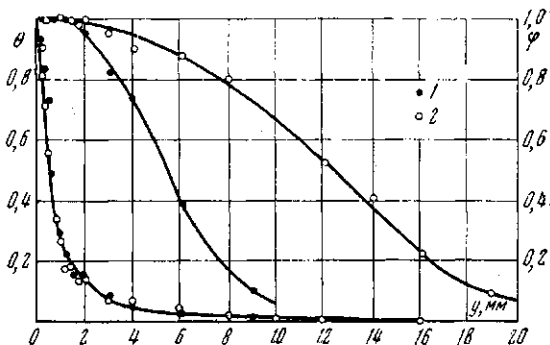


Рис. 5. Профили коэффициента перемежаемости и средней температуры,  $\theta = (T - T_{\infty}) / (T_{ст} - T_{\infty})$ :  
1 —  $Ra = 1,75 \cdot 10^{10}$ ,  $x = 286$  мм,  $\Delta T = 11,35^\circ C$ ; 2 —  $Ra = 5,24 \cdot 10^{10}$ ,  $x = 381$  мм,  $\Delta T = 11,6^\circ C$

Институт теплофизики  
Сибирского отделения АН СССР

Поступила в редакцию  
24 IV 1971

#### ЛИТЕРАТУРА

1. G. S. H. Lock, F. J. Trotter. Int. J. Heat Mass Transfer, **41**, 1225, 1968.
2. Влит, Лайю. Теплопередача, № 4, 1969.
3. С. С. Кутателадзе, В. М. Боршанский. Справочник по теплопередаче. Госэнергоиздат, 1959.
4. Н. Я. Ярышев. Теоретические основы измерения нестационарных температур. «Энергия», 1967.
5. Н. К. Виниченко и др. Турбулентность в свободной атмосфере. Гидрометеорологическое изд., Л., 1968.