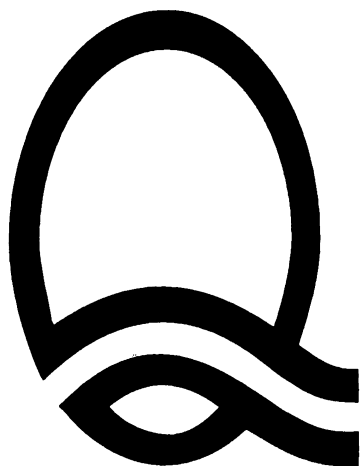


Российская Академия наук,
Отделение энергетики, машиностроения,
механики и процессов управления

Министерство образования РФ

Московский энергетический институт
(технический университет)

Национальный комитет РАН
по теплообмену



ТРУДЫ ТРЕТЬЕЙ РОССИЙСКОЙ НАЦИОНАЛЬНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ПО ТЕПЛООБМЕНУ

В ВОСЬМИ ТОМАХ

21-25 октября 2002 года
Москва

Том 2

Вынужденная
конвекция
однофазной
жидкости



Москва
Издательство МЭИ
2002

ТУРБУЛЕНТНЫЙ ТЕПЛОПЕРЕНОС В УСЛОВИЯХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты комбинированных измерений продольной компоненты вектора поверхностного трения, теплового потока в стенку и скорости потока в нестационарном турбулентном пограничном слое. Анализ пространственно-временных корреляционных функций поверхностного трения и теплового потока в стенку показал, что наложенные пульсации в диапазоне частот 5-60 Гц не влияют на характер статистической связи между этими параметрами. Во всех случаях между трением и тепловым потоком отмечена жесткая корреляционная связь с величиной коэффициента корреляции 0,8-0,9 без какого-либо фазового сдвига. На базе условно усредненных характеристик трения и теплового потока проведено количественное сопоставление двух механизмов возмущения в пристеночной области, определяемых наложенной высокочастотной нестационарностью и турбулентными "всплесками".

1. ВВЕДЕНИЕ

Связь между параметрами тепловых и гидродинамических процессов в обычных турбулентных пограничных слоях основывается на аналогии Рейнольдса. В градиентных течениях подобие профилей скорости и температуры потока нарушается. В нестационарных же течениях существенную роль играет скорость изменения градиента, поскольку перестройка потока происходит с некоторым запаздыванием по фазе. По этой причине обширный экспериментальный материал и теоретические обобщения по связи процессов переноса импульса и теплоты в турбулентном пограничном слое с продольным градиентом давления для нестационарных течений вряд ли применим и, в лучшем случае, может быть распространен лишь на квазистационарные режимы.

В настоящее время более исследованной является кинематическая структура нестационарного турбулентного пограничного слоя. Среди наиболее надежных экспериментальных данных можно выделить результаты [1-7]. С учетом сложности и многообразия эффектов влияния нестационарности на кинематическую структуру потока предпринят ряд попыток классификации нестационарных течений. Наиболее полными являются классификации по Рамапрану и Ту [2], Григорьеву и др. [8]. В них выделяется пять групп нестационарных течений. В основу классификации положен механизм "распространения" турбулентности.

Нестационарный турбулентный теплоперенос исследовался крайне редко. Наиболее значительные результаты в этом научном направлении в нашей

стране получены Дрейцером Г.А., Кошкиным В.К., Калининным Э.К., Бухаркиным В.Б., Краевым Б.М. и др. (например, [9, 10]). Экспериментально установлено существенное (на некоторых режимах – двукратное) изменение теплообмена и турбулентной вязкости по сравнению со стационарными режимами. Однако исследования выполнены лишь для переходных процессов (ускорение или замедление потока). Темпы изменения расхода в экспериментах были таковы, что по сложившейся классификации нестационарных течений их можно отнести к квазистационарной и низкочастотной группам.

В данной работе предпринята попытка экспериментального изучения процессов переноса импульса и теплоты в турбулентном пограничном слое на пластине для более сложного случая гидродинамической нестационарности потока, а именно, при наложенных гармонических пульсациях скорости в ядре потока. Особое внимание было уделено пристеночной области пограничного слоя. Известно, что определяющую роль в ней играют когерентные структуры, называемые "всплесками" (burstings). Подавляющая часть производства энергии турбулентности в пограничном слое связана именно с этим феноменом. На "всплески" впервые обратили внимание в связи с низкоскоростными продольными струйками в пограничном слое, обнаруженными методами визуализации. Часть этих струек поднимается вверх, осциллирует и потом разрушается. Это явление сопровождается сносом крупномасштабных комков жидкости с большим импульсом, которые, возникнув во внешней области, перемещаются вниз под небольшим углом по направлению к стенке. Такое движение вызывает сильное перемешивание с низкоскоростной жидкостью, движущейся вовне.

В настоящем исследовании сделана попытка количественно сопоставить влияние на трение и тепловой поток в стенку двух механизмов возмущения в пристеночной области, определяемых наложенной нестационарностью и турбулентными "всплесками".

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ

Выполнены комбинированные измерения мгновенных локальных величин теплового потока в стенку, напряжения трения на стенке, а также скорости в ядре потока при различной частоте и интенсивности наложенных пульсаций. Условия экс-

периментов охватывали практически весь диапазон режимов гидродинамической нестационарности - от квазистационарных до высокочастотных (5÷60 Гц).

Эксперименты проводились в рабочем участке аэродинамической трубы разомкнутого типа, подключенной к установке для создания пульсирующего потока. Схема, принцип действия и технические характеристики этой установки приведены в статье [11]. Рабочий участок имел прямоугольное поперечное сечение 100×130 мм. Измерительное сечение располагалось на расстоянии 630 мм от точки начала развития турбулентного пограничного слоя. Турбулентный пограничный слой в измерительном сечении имел толщину $\delta \approx 10$ мм.

Одна из стенок рабочего участка выполнена из тонкого алюминиевого листа и омывалась водой, температура которой стабилизировалась в пределах от 0 до 100°C. Комбинированные измерения удельного теплового потока в стенку и поверхностного трения выполнялись при помощи широко апробированного нового датчика (например, [12]), разработанного авторами. Принцип его основан на измерении градиента температуры и скорости в пределах толщины вязкого подслоя пограничного слоя. Измерительный объем по нитям датчика 2мм×2мм×0,1мм, предельная граничная частота не менее 1000 Гц. Токоподводы к нитям датчика выведены непосредственно через металлическую стенку при минимальной толщине изоляции, что исключает нарушение граничных условий в области расположения чувствительных элементов. Скорость на оси трубы измерялась однопунктным термоанемометрическим датчиком скорости. Работа термоанемометрических датчиков поддерживалась аппаратурой DISA 55M, которая позволяла проводить измерения пульсаций трения и скорости до частоты 10 кГц. Ограничение по частоте для пульсаций теплового потока составляло 1 кГц. Частота опроса АЦП составляла 2,5 Гц. Одно измерение длилось 4 с. По каналу измерения поверхностного трения использовалась дополнительная нить для термокомпенсации. Относительная погрешность измерений поверхностного трения и скорости потока составила около 5% при доверительной вероятности 0,9. Относительная погрешность измерений теплового потока в стенку составила около 10% при доверительной вероятности 0,9.

Измерения проводились при постоянной скорости потока на оси трубы $U_\infty \approx 5$ м/с в стационарных и нестационарных (частота вынужденных пульсаций 5, 20, 40 и 60 Гц) условиях. Средняя величина поверхностного трения и теплового потока в стенку в стационарном течении составляла примерно 0,1 Н/м² и 400 Вт/м², соответственно. Интенсивность пульсаций осевой скорости, поверхностного трения и теплового потока в стенку в стационарном режиме составляла $\sigma_U/U_\infty = 0,01$, $\sigma_{\tau_x}/\bar{\tau}_x = 0,35$, $\sigma_{q_w}/\bar{q}_w = 0,12$ соответственно.

Для детекции пристеночных когерентных структур ("всплесков") использовалась хорошо известная техника VITA. Ее описание можно найти, например, в работе [13]. "Локальная" дисперсия сигнала по трению $\text{var}(x_i, t, T)$ определялась с помощью выражения:

$$\text{var}(x_i, t, T) = \frac{1}{T} \int_{t-0,5T}^{t+0,5T} \tau_x^2(s) ds - \left(\frac{1}{T} \int_{t-0,5T}^{t+0,5T} \tau_x(s) ds \right)^2,$$

где T - время локального усреднения. В качестве функции детекции использовался критерий:

$$D_t(t, T) = \begin{cases} 1 & \text{var} > k\tau_x^2 \\ 0 & \text{иначе} \end{cases},$$

где k определяет порог детекции. Чтобы не было искажений в величине локального среднего некоторого явления, время усреднения T должно быть одного порядка с временным масштабом этого явления. Обычно считается, что период между всплесками в стационарном пограничном слое составляет величину порядка $6\delta/U_\infty$ (см. [14]). В наших экспериментах следовало ожидать, что период между всплесками будет составлять 10÷15 мс. Кроме того, величина T должна быть меньше, чем продолжительность изучаемого явления, т.е. меньше средней продолжительности выброса в нашем случае. Согласно [14], по некоторым оценкам характерный масштаб длин вихрей с большой энергией в окрестности стенки может составлять $(20\div 100)v/u_*$ (1÷5 мс в наших экспериментах). Как правило, k полагают равным 1÷1,2. В настоящей работе было принято $T=2,8$ мс и $k=1,2$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

В соответствии с предложенной Григорьевым и др. [8] классификацией пульсирующих потоков представленные в работе режимы течения можно отнести к "низкочастотной" ($f=5$ Гц, $\beta=0,22$) и "высокочастотной" ($f=20$ Гц, $\beta=0,05$; $f=40$ Гц, $\beta=0,09$; $f=60$ Гц, $\beta=0,06$) группам. Границы между группами задаются в плоскости двух безразмерных комплексов: безразмерной частоты пульсаций $\bar{f} = 2f\bar{\delta}/u_*$ и относительной амплитуды колебаний скорости $\beta = A_f/U_\infty$, где f - частота пульсаций, $\bar{\delta}$ - средняя по времени толщина пульсирующего турбулентного пограничного слоя, u_* - усредненное по времени значение динамической скорости, U_∞ и A_f - средняя скорость и амплитуда наложенных пульсаций скорости в ядре потока. Согласно работе [8], для режимов, относящихся к низкочастотной группе, влияние наложенной нестационарности проявляется в появлении фазового сдвига в колебаниях интенсивностей турбулентных пульсаций. Но средние профили скорости остаются квазистационарными. Для высокочастотного режима характерно существенное изменение всех параметров течения под воздействием наложенной нестационарности.

Анализ влияния наложенной нестационарности на средние параметры потока показал, что в пределах погрешности эксперимента наложенная нестационарность не повлияла на среднюю величину поверхностного трения и теплового потока в стенку на всех частотных режимах. Однако в литературе известны данные как подтверждающие, так и опровергающие этот вывод. Трудность проблемы обуславливается исключительной сложностью физических процессов, происходящих в пульсирующем потоке, разнообразием режимов течения (существенно влияют, как минимум три параметра: среднерасходное число Рейнольдса, частота наложенных колебаний и амплитуда пульсаций среднерасходной скорости) и техническими трудностями при организации эксперимента. Поэтому вопрос даже о качественном влиянии наложенных пульсаций на осредненные параметры турбулентного течения следует считать открытым.

Анализ пространственно-временных корреляционных функций поверхностного трения и теплового потока в стенку показал, что наложенные пульсации в диапазоне частот 5÷60 Гц не влияют на характер статистической связи между этими параметрами по сравнению со стационарным течением. Во всех случаях между трением и тепловым потоком отмечена жесткая корреляционная связь с величиной коэффициента корреляции 0,8÷0,9 без какого-либо фазового сдвига (рис.1).

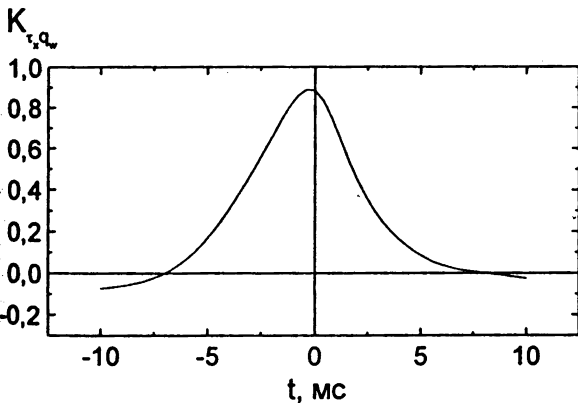


Рис. 1. Пространственно-временная корреляционная функция поверхностного трения τ_x и теплового потока в стенку q_w в турбулентном пограничном слое с наложенной нестационарностью ($f \approx 40$ Гц)

Качественное представление о влиянии высокочастотной наложенной нестационарности и турбулентных "всплесков" на процессы переноса импульса и тепла в пристенной области пограничного слоя можно получить из рассмотрения рис.2. Очевидно, что амплитуда Фурье-составляющей сигнала по трению, соответствующая частоте внешней нестационарности, невелика по сравнению с возмущениями, вызываемыми турбулентными "всплесками" (их можно отследить по функции детекции, показанной в нижней части рисунка). Кроме того, "всплески" очень отчетливо видны и на сигнале по тепловому потоку в стенку. По-видимому, при дан-

ной величине параметра $\beta=0,09$ гидродинамическая нестационарность оказывает слабое влияние на турбулентный теплоперенос в пристенной области.

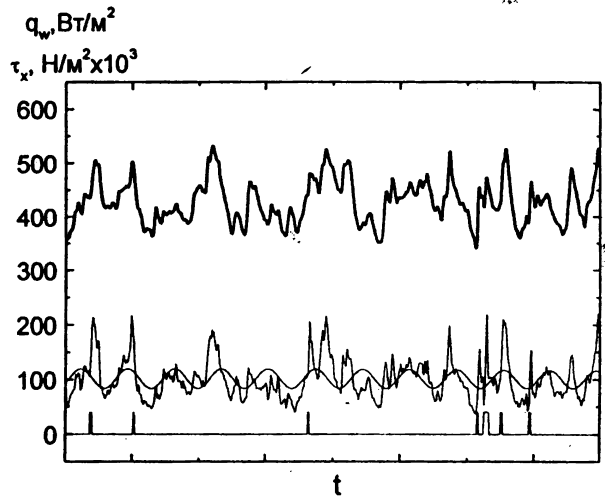


Рис. 2. Фрагмент осциллограммы сигналов теплового потока в стенку $q_w(t)$ (жирная линия сверху), функции детекции "всплесков" $D_\tau(t)$ (снизу), а также общего сигнала по трению $\tau_x(t)$ и Фурье-составляющей сигнала по трению, соответствующей частоте наложенной нестационарности $f \approx 40$ Гц (синусоида)

Этот вывод подтверждается и результатами анализа экспериментальных данных с помощью хорошо известного и многократно описанного в литературе метода условного фазового усреднения. По данным таблицы 1 высокочастотная наложенная нестационарность по крайней мере не усиливает интенсивность турбулентных "всплесков". Во всех случаях интенсивность возмущений, вызываемых "всплесками", была значительно больше интенсивности возмущений, порождаемых внешней нестационарностью.

Таблица 1. Отклонение условно усредненных в соответствии с техникой VITA ($\langle \tau_x \rangle_{VITA}$, $\langle q_w \rangle_{VITA}$) и техникой фазового усреднения ($\langle \tau_x \rangle$, $\langle q_w \rangle$) значений трения и теплового потока от соответствующих безусловных средних τ_x и q_w

f, Гц	$\langle \tau_x \rangle_{VITA} / \tau_x$	$\langle q_w \rangle_{VITA} / q_w$	$\langle \tau_x \rangle / \tau_x$	$\langle q_w \rangle / q_w$
0	1,44	1,12	-	-
40	1,37	1,08	1,27	1,04
60	1,36	1,07	1,19	1,02

Примечание:

- Для усредненных по фазе значений трения и теплового потока ($\langle \tau_x \rangle$, $\langle q_w \rangle$) бралось значение фазового угла $\pi/2$, т.к. именно при этом угле отклонение условно средних значений от соответствующего безусловного среднего было наибольшим.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты измерений продольной компоненты вектора поверхностного трения, теплового потока в стенку и скорости потока в нестационарном турбулентном пограничном слое с помощью нового комбинированного датчика. Анализ пространственно-временных корреляционных функций поверхностного трения и теплового потока в стенку показал, что наложенные пульсации в диапазоне частот 5÷60 Гц не влияют на характер статистической связи между этими параметрами. Во всех случаях между трением и тепловым потоком отмечена жесткая корреляционная связь с величиной коэффициента корреляции 0,8÷0,9 без какого-либо фазового сдвига. На базе условно усредненных характеристик трения и теплового потока проведено количественное сопоставление двух механизмов возмущения в пристеночной области, определяемых наложенной высокочастотной нестационарностью и турбулентными "всплесками". При использованных в экспериментах значениях параметра $\beta=0,06...0,09$ гидродинамическая нестационарность оказывает слабое влияние на турбулентный теплоперенос в пристенной области. Напротив, турбулентные "всплески" ясно прослеживаются на осциллограммах сигнала по тепловому потоку и, очевидно, играют важную роль в теплопереносе в пристенной зоне нестационарного турбулентного пограничного слоя.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №00-15-96690, №00-02-16409, 02-02-16719 и №02-02-06144), Минобразования (грант МАИ) и ФЦП "Интеграция", проект №Б0020+Б0019.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Букреев В.И., Шахин В.М. Экспериментальное исследование турбулентного неустановившегося течения в круглой трубе // *Аэромеханика*. М.: Наука, 1976. С.180-187.
2. Ramaprian B.R., Tu S.W. Fully developed periodic turbulent pipe flow. Part 2. The detailed structure of the flow // *Journal of Fluid Mechanics*. 1983.N 137. P.59-81.
3. Acharya M., Reynolds W.C. Measurements and predictions of a fully developed turbulent channel flow with imposed controlled oscillations. Stanford Univ. Thermosci. Div. Tech. Rep. TF-8, 1975.
4. Кусто Ж., Дезопер А., Худевиль Р. Структура и развитие турбулентного пограничного слоя в осциллирующем внешнем потоке // *Турбулентные сдвиговые течения* I. М.: Машиностроение, 1982. С.159-177.
5. Karlsson S.K.F. An unsteady turbulent boundary layer // *Journal of Fluid Mechanics*. 1959. N.5:4. P.622-636.
6. Парих П.Г., Рейнольдс В.К., Джаяраман Р. Характеристики нестационарного турбулентного пограничного слоя // *Аэрокосмическая техника*. 1983. N 1:1. С.73-80.
7. Simpson R.L., Shivaprasad B.G., Chew I.T. Some features of unsteady separating turbulent boundary layers // *IUTAM Symp. Unsteady Turbulent Shear Flows*, Toulouse, France, 1981. Berlin: Springer, 1981. P.109-119.

8. Григорьев М.М., Кузьмин В.В., Фафурин А.В. Классификация пульсирующих турбулентных течений // *Инженерно-физический журнал*. 1990. N 59:5. С.725-735.
9. *Нестационарный теплообмен* / В.К.Кошкин, Э.К.Калинин, Г.А.Дрейцер и др. М.: Машиностроение, 1973.
10. Dreitzer G.A., Bukharkin V.B., Kraev B.M., Neverov A.S. Experimental study of the effect of hydrodynamic unsteadiness on a turbulent tube gas flow structure // *Turbulence, Heat and Mass Transfer 2*. Netherlands: Delft Univ. Press, 1997. P.269-278.
11. Козлов А.П., Михеев Н.И., Стинский Г.В., Сухоруков О.В. Влияние наложенных пульсаций скорости потока на мгновенный вектор поверхностного трения // *Изв.вузов. Авиационная техника*. 1999. №3. С.51-53.
12. Давлетшин И.А. Взаимосвязь процессов переноса импульса и теплоты в турбулентном отрывном течении / Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Казань: КГТУ им.А.Н.Туполева, 2001. 20 с.
13. Blackwelder R.F., Kaplan R.E. On the wall structure of the turbulent boundary layer // *Journal of Fluid Mechanics*. 1959. N.132. P.89-112.
14. Кантуэлл Б.Дж. Организованные движения в турбулентных потоках / *Вихри и волны*. М.: Мир, 1984. С.9-79.