

УДК 620
Р 764

РНСЭ, 10-14 сентября 2001: Материалы докладов. Казань:
Казан. гос. энерг. ун-т, 2001 – Т. I.
ISBN 5-89873-017-6

В первый том материалов симпозиума включены тексты докладов по тепловым электрическим станциям, их энергетическим системам и агрегатам, промышленной теплоэнергетике и теплообмену при ламинарных и турбулентных течениях.

ISBN 5-89873-017-6

© Казан. гос. энерг. ун-т, 2001

ВЗАИМОСВЯЗЬ ПОВЕРХНОСТНОГО ТРЕНИЯ И ТЕПЛОВОГО ПОТОКА В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ТЕЧЕНИЯ¹

Ф.С. Занько*, Н.И. Михеев**, Г.В. Стинский**

*Казанский государственный технический университет им.А.Н.Туполева

**Отдел энергетики Казанского научного центра РАН

Течение турбулентного пограничного слоя с наложенными гармоническими пульсациями скорости часто встречается в различных технических приложениях, например, на поверхности несущего винта вертолета, на выходе поршневого насоса, на поверхности лопатки газовой турбины, вращающейся в следах за лопатками статора и т.п. При исследовании пульсирующих потоков, как правило, измеряют профили продольной компоненты скорости [1], усредненные характеристики турбулентности [2] и теплообмена [3], а также средние и пульсационные характеристики поверхностного трения [4]. В настоящей работе проводились одновременные измерения поверхностного трения и теплового потока в стенку. Как известно, в стационарном турбулентном пограничном слое при нулевом градиенте давления выполняется аналогия Рейнольдса. В данной работе предпринята попытка исследовать влияние наложенных пульсаций скорости на статистическую взаимосвязь пульсаций поверхностного трения и теплового потока в турбулентном пограничном слое.

Усложнение физических процессов, происходящих в турбулентном пограничном слое, за счет наложенной нестационарности для исследователя в какой-то мере компенсируется появлением новых возможностей анализа экспериментальных данных. Имеется в виду хорошо известный метод фазового усреднения, который и был использован в настоящей работе.

Эксперименты проводились в аэродинамической трубе разомкнутого типа. Рабочей средой являлся воздух. Наложённые гармонические колебания потока создавались с помощью экспериментальной установки, обеспечивавшей независимое регулирование частоты и амплитуды наложенных пульсаций. Схема, принцип действия и технические характеристики этой установки приводятся в работе [4]. Рабочий участок в настоящих экспериментах имел прямоугольное поперечное сечение 100×130 мм. Измерительное сечение располагалось на расстоянии 630 мм от точки начала развития турбулентного пограничного слоя. Емкость с водой, закрепленная на рабочем участке аэродинамической трубы, позволяла поддерживать температуру стенки постоянной и равной 40°C. Разность температур между потоком и стенкой составляла 19°C. Турбулентный пограничный слой в измерительном сечении имел толщину $\delta \approx 12$ мм.

Измерения поверхностного трения и теплового потока в стенку проводились с помощью комбинированного датчика, схема и описание которого даны в [5]. Скорость на оси трубы измерялась обычным одноточечным термоанемометрическим датчиком скорости.

Измерения поверхностного трения, скорости и теплового потока осуществлялись при помощи термоанемометрической аппаратуры DISA 55M, которая позволяла проводить измерения пульсаций трения и скорости до частоты 10 кГц. Ограничение по частоте для пульсаций теплового потока составляло 1 кГц. Одно измерение длилось 4 с. Частота опроса АЦП составляла 2,5 кГц.

Оценки погрешности измерений параметров потока определялись в основном погрешностями градуировок. Относительная погрешность измерений поверхностного трения и скорости

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №00-02-16409а, №00-15-96690 и №01-02-06212), Минобразования (грант МАИ) и ФЦП "Интеграция" (проект №А0012).

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 $\bar{U}=5,8$ м/с в стационарных и нестационарных (частота вынужденных пульсаций 2,25 и 21,75 Гц) условиях. Средняя величина поверхностного трения и теплового потока в стенку в стационарном течении составляла $0,122$ Н/м² и 460 Вт/м² соответственно. Интенсивность пульсаций осевой скорости, поверхностного трения и теплового потока в стенку в стационарном режиме составляла $\sigma_U / \bar{U}=0,015$, $\sigma_{\tau_x} / \bar{\tau}_x=0,344$, $\sigma_{q_w} / \bar{q}_w=0,142$, соответственно.

В соответствии с критерием, полученным из анализа порядка членов в уравнениях Прандтля [6], предельная частота наложенных пульсаций, до которой пульсирующий поток можно считать квазистационарным, составляет:

$$f < L/U_\infty \approx 9 \text{ Гц.}$$

Следовательно, при частоте наложенных пульсаций $f=2,25$ Гц поток можно считать квазистационарным, а при частоте $f=21,75$ Гц следует ожидать проявлений нестационарных эффектов. В работе [2] предложена более строгая классификация течений с наложенной нестационарностью, согласно которой на основе анализа механизма распространения кинетической энергии турбулентности выделено пять групп режимов течений, отличающихся характером влияния наложенных пульсаций скорости на параметры течения. Границы между группами указаны в плоскости двух безразмерных комплексов: безразмерной частоты пульсаций $\bar{f} = 2f\bar{\delta} / \bar{U}$, и относительной амплитуды колебаний скорости $\beta = A_f / \bar{U}$, где f - частота пульсаций, $\bar{\delta}$ - средняя по времени толщина пульсирующего турбулентного пограничного слоя, \bar{U} - усредненное по времени значение динамической скорости, \bar{U} и A_f - средняя скорость и амплитуда наложенных пульсаций скорости в ядре потока. Настоящие экспериментальные данные можно отнести ко второй и четвертой, т.е. к "низкочастотной" ($f=2,25$ Гц, $\beta=0,15$) и "высокочастотной" ($f=21,75$ Гц, $\beta=0,15$) группам. Согласно работе [2], 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 наложенная нестационарность не повлияла на среднюю величину поверхностного трения и теплового потока в стенку при высокочастотном режиме. В то же время оба этих параметра несколько уменьшились при низкочастотном режиме. Описание подобного эффекта в отношении поверхностного трения встречается в литературе [7]. Однако, изменение среднего трения и теплового потока в настоящих экспериментах по величине сопоставимо с погрешностью измерений. Поэтому для более определенных выводов необходимо повторить данные эксперименты, приняв специальные меры для снижения погрешностей измерений.

Интенсивность пульсаций поверхностного трения $\frac{\sigma_{\tau_x}}{\bar{\tau}_x}$ и теплового потока $\frac{\sigma_{q_w}}{\bar{q}_w}$ при

низкочастотном режиме возросла в 1,5 и 1,62 раза, соответственно, по сравнению со стационарным потоком. При высокочастотном режиме эти величины изменились под воздействием нестационарности по-разному: относительные пульсации теплового потока в стенку выросли незначительно (на 11%), а относительные пульсации трения увеличились более чем в 1,5 раза.

Были определены пространственно-временные корреляционные функции пульсаций скорости и теплового потока $R_{U\tau}$, скорости и поверхностного трения R_{Uq} и теплового потока и трения $R_{q\tau}$. Величина максимума коэффициента корреляции K_{\max} и фазовое смещение этого максимума φ при высокочастотном и низкочастотном режимах представлены в Таблице 1. В целях сопоставления указанные пространственно-временные корреляционные функции рассчитывались также в случае, когда из сигнала по трению и тепловому потоку были

вырезаны частоты, соответствующие частоте наложенной нестационарности. Для сравнения приведены и аналогичные результаты для стационарного режима. Отрицательная величина фазового сдвига φ_{xy} означала, что пульсации параметра Y отставали по фазе от пульсаций параметра X.

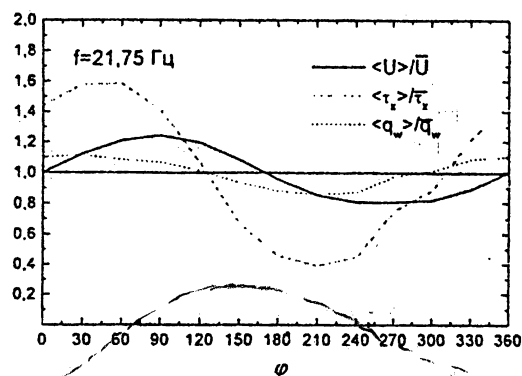
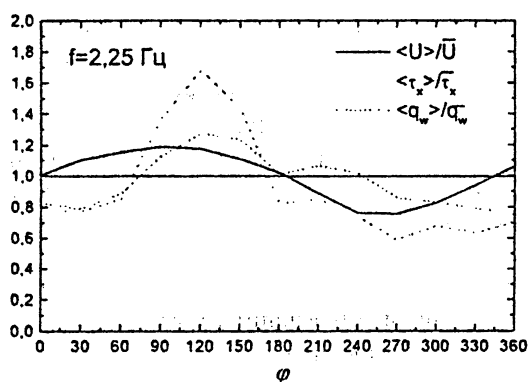
Таблица 1. Максимум коэффициента корреляции K и фазовое смещение максимума коэффициента корреляции φ пространственно-временных корреляционных функций R_{U_t} , R_{U_q} и R_{q_t} параметров потока

Параметр	Стационарный режим	Нефильтрованный сигнал		Фильтрованный сигнал	
		f=2,25 Гц	f=21,75 Гц	f=2,25 Гц	f=21,75 Гц
K_{U_q}	нет	ок. 0,56	0,44	нет	нет
φ_{U_q}	нет	св. +40°	-28°	нет	нет
K_{U_t}	нет	0,56	0,77	нет	нет
φ_{U_t}	нет	+9°	-31°	нет	нет
K_{q_t}	0,9	0,86	0,84	0,86	0,86
φ_{q_t}	-0,4 мс	-0,4 мс (-0°)	-0,4 мс (-3°)	-0,4 мс (-0°)	-0,4 мс (-3°)

Прежде всего, необходимо отметить, что между пульсациями теплового потока в стенку и поверхностного трения на обоих нестационарных режимах существует жесткая корреляционная связь. Наложенная нестационарность не вызывает никакого фазового сдвига между пульсациями трения и теплового потока. Это хорошо заметно и на осциллограммах сигналов, которые здесь не приводятся. Далее, любопытно, что в то время как при высокочастотном режиме пульсации теплового потока и поверхностного трения отстают по фазе от пульсаций осевой скорости примерно на одну и ту же величину ($\approx 30^\circ$), при низкочастотном режиме пульсации теплового потока опережают пульсации осевой скорости на величину свыше 40° , а пульсации трения - на 9° . Между собой фазового сдвига у пульсаций поверхностного трения и теплового потока в этом случае нет. Это говорит о том, что при низкочастотном режиме на величину фазового сдвига заметно влияют два механизма взаимосвязи пульсаций трения и теплового потока: первый - на частоте наложенных пульсаций скорости (его влияние слабо), второй - на частоте турбулентных пульсаций (этот механизм доминирует). Следует заметить, что в известных экспериментах колебания поверхностного трения опережали по фазе колебания скорости на величину порядка $5 \div 45^\circ$ [8-10].

С помощью процедуры фазового усреднения были получены графики изменения средних и пульсационных характеристик поверхностного трения и теплового потока в стенку в зависимости от фазы колебания осевой скорости (Рис. 1-2).

По данным работы [11], в фазе ускорения потока сопротивление трения возрастает. При замедленном движении наблюдается обратная картина. Кроме того, известно, что ускорение потока турбулентного пограничного слоя способствует его ламинаризации, а замедление, наоборот, увеличивает уровень интенсивности турбулентных пульсаций. Как видно из Рис. 1 и 2, эти закономерности определенно проявляются на высокочастотном режиме: графики условно усредненного по фазе трения и тепловой скорости близки по форме к синусоиде, отстающей по фазе от колебаний наложенных пульсаций на величину порядка 30° . Максимум интенсивности турбулентных пульсаций трения соответствует фазе торможения потока с тем же сдвигом по фазе.



$\frac{\partial p}{\partial x}$

Рис.1. Зависимость средних характеристик поверхностного трения $\langle \tau_x \rangle / \bar{\tau}_x$ и теплового потока в стенку $\langle q_w \rangle / \bar{q}_w$ от фазы колебания осевой скорости φ при низкочастотном ($f=2,25$ Гц) и высокочастотном ($f=21,75$ Гц) режимах

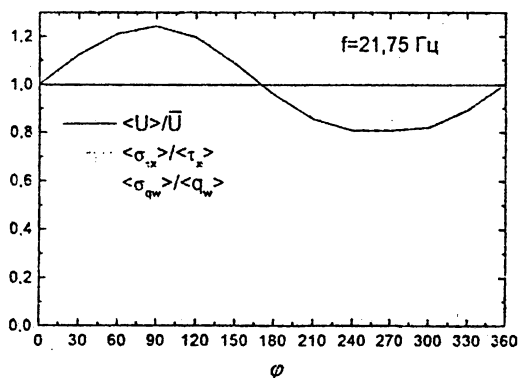
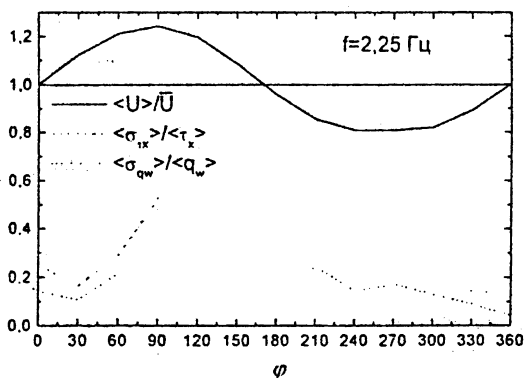


Рис.2. Зависимость относительных пульсационных характеристик поверхностного трения $\langle \sigma_{\tau_x} \rangle / \langle \tau_x \rangle$ и теплового потока в стенку $\langle \sigma_{q_w} \rangle / \langle q_w \rangle$ от фазы колебания осевой скорости φ при низкочастотном ($f=2,25$ Гц) и высокочастотном ($f=21,75$ Гц) режимах

Несколько сложнее обстоит дело при низкочастотном режиме. Фазового сдвига между пульсациями трения и осевой скорости, если судить по форме графиков условно усредненных средних и пульсационных характеристик этих параметров, практически нет. Однако, существенные деформации претерпевает сам вид условно усредненных зависимостей трения и теплового потока по фазе: часть этих графиков, лежащая выше линии $\langle \tau_x \rangle / \bar{\tau}_x = \langle q_w \rangle / \bar{q}_w = 1$, по ширине составляет только треть от диапазона изменения фазового угла (вместо половины диапазона в случае высокочастотного режима). Максимум турбулентных пульсаций трения при низкочастотном режиме имел место в начальной фазе торможения потока.

При обоих нестационарных режимах характер изменения средних и пульсационных характеристик трения и теплового потока в зависимости от фазового угла был схожим, без каких-либо сдвигов по фазе относительно друг друга. Временной интегральный масштаб пульсаций в сигнале по трению и тепловому потоку, из которого была вырезана частота наложенной нестационарности, соответствует по порядку величины временному интегральному масштабу турбулентных пульсаций в стационарном турбулентном пограничном

слое (5,56 и 3,66 мс для пульсаций теплового потока и трения, соответственно). Линейный интегральный масштаб по трению при стационарном режиме имеет порядок толщины динамического пограничного слоя. Учитывая, что удаление частоты наложенной нестационарности из сигнала по трению и тепловому потоку практически не влияет на величину максимального коэффициента корреляции (см. Таблицу 1) между этими параметрами, то, очевидно, можно утверждать, что механизм взаимосвязи пульсаций поверхностного трения и теплового потока в стенку в течениях с наложенной нестационарностью реализуется на частотах порядка частот турбулентных пульсаций.

Таким образом, при низкочастотной и высокочастотной нестационарности потока на внешней границе турбулентного пограничного слоя параметры на стенке τ_x и q_w в среднем отслеживают пульсации скорости в ядре потока с фазовым сдвигом, зависящим от частоты наложенных пульсаций. Интенсивность пульсаций τ_x и q_w существенно изменяется по фазе наложенных пульсаций скорости, причем при всех фазовых углах интенсивность пульсаций τ_x в 2...3 раза выше интенсивности пульсаций q_w . Установлено, что наложенная нестационарность не влияет на характер связи между турбулентными пульсациями τ_x и q_w : в пульсирующем потоке, как и в стационарном, между этими параметрами имеет место жесткая корреляционная связь с максимальным коэффициентом корреляции свыше 0,8 при практическом отсутствии фазового сдвига.

Литература

1. Кусто Ж., Депозер А., Худевиль Р. Структура и развитие турбулентного пограничного слоя в осциллирующем внешнем потоке. В кн.: Турбулентные сдвиговые течения. Ч.1. М. 1982. С.159-177.
2. Григорьев М.М., Кузьмин В.В., Фафурин А.В. Классификация пульсирующих турбулентных течений. Инж.-физ. журн. 1990. Т.59. №5. С.725-735.
3. Диатян Р.Э. Теплообмен в турбулизированных потоках с наложенной периодической скоростной нестационарностью. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. АН УССР. Институт технической теплофизики. Киев. 1991.
4. 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.
5. Давлетшин И.А. Взаимосвязь процессов переноса импульса и теплоты в турбулентном отрывном течении. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. КГТУ им.А.Н.Туполева. Казань. 2001.
6. Эккерт Э.Р., Дрейк Р.М. Теория тепло- и массообмена. М.-Л. Госэнергоиздат. 1961.
7. Кирмсе. Исследование пульсирующего турбулентного течения в трубе. Тр. Ам. общ. инж.-мех. Теоретические основы инженерных расчетов. 1979. Сер.D. Т.101. №4. С.139-146.
8. Cousteix J., Houdeville R., Javelle J. Response of turbulent boundary layer to a pulsation of the external flow with and without adverse pressure gradient. In: Unsteady Turbulent Shear Flows. Symp. Toulouse, 1981. Berlin. Springer. 1981. P.120-144.
9. Kita I., Adachi I., Hirose K. Periodically oscillating turbulent flow in a pipe. Bull. of the JSME. 1980. V.23. №179. P.656-664.
10. Маккроски. Некоторые последние работы по нестационарной гидромеханике. Тр. Ам. общ. инж.-мех. Теоретические основы инженерных расчетов. 1977. Сер.D. Т.99. №1. С.93-130.
11. Daily J.W., Hankey W.L., Olive R.W., Jordaan J.M. Resistance coefficients for accelerated and decelerated flows through smooth tubes and orifices. Trans. of the ASME. 1956. Vol.78. №5. P.1071-1077.

CORRELATION OF SKIN FRICTION AND HEAT FLUX IN A PULSATILE TURBULENT BOUNDARY LAYER¹

P.S.Zanko*, N.I.Mikheyev**, G.V.Stinskii**

*Kazan State Technical University

**Power Eng. Dept., Kazan Sci. Centre, Russian Academy of Sciences

Turbulent boundary layers with superimposed (external) harmonic pulsations of velocity are everyday occurrence in different technical applications. Such flows take place on lifting airscrew surfaces, at the outlet of a reciprocating pump, on a gas turbine blade which rotates after blades of the stator and so on. Longitudinal velocity profile [1], mean turbulent characteristics [2], heat exchange characteristics [3] as well as mean and fluctuating components of skin friction [4] are usually measured during experimental investigations of pulsatile flows. In the present experiments simultaneous measurements of skin friction and wall heat flux were provided. It is common knowledge that the so called Reynolds analogy takes place in a stationary turbulent boundary layer where pressure gradient dp/dx equals zero. In this paper we discuss the influence of external velocity pulsations on correlation of skin friction and heat flux in a pulsatile turbulent boundary layer.

Complication of physical processes in a turbulent boundary layer due to superimposed nonstationarity is compensated to some extent by new possibilities of experimental data analysis. We mean a well-known phase averaging technique, which was used in the present investigation.

The experiments were provided in a non-return-flow wind tunnel. Air was used as a medium. Superimposed harmonic flow oscillations were organized with the help of an experimental setup which gives a capability to independently regulate frequency and amplitude of external pulsations. Scheme, description and technical characteristics of the setup can be found in [4]. Working section used in the present experiments had a cross-section looked like a rectangular 100×130 mm. The measuring cross-section was located at the distance of 630 mm from the beginning of the turbulent boundary layer. A vessel with water which was fixed on the working section made it possible to keep the wall temperature constant (40°C). The wall temperature was greater than the flow temperature on 19°C. Thickness of the turbulent boundary layer at the measuring cross-section was $\delta \approx 12$ mm.

Skin friction and wall heat flux were measured using a combined probe. Scheme and description of the probe can be found in [5]. Axial-flow velocity was measured using conventional hot-wire probe.

Skin friction and wall heat flux measurements were provided with the aid of hot-wire apparatus DISA 55M. The apparatus gives a capability to measure friction and velocity pulsations till the frequency of 10 kHz. The measurements of heat flux pulsations had an upper frequency limit of 1 kHz. In any case the quantization frequency and the sampling time were 2,5 kHz and 4 s, respectively.

Mainly metering errors of flow parameters were connected with calibration errors. Relative metering error of skin friction and velocity was about 5% (with confidence probability of 0,9). Relative metering error of wall heat flux was about 10% (with confidence probability of 0,9).

During measurements the axial-flow velocity was constant ($\bar{U} = 5,8$ m/c) under stationary and nonstationary (external pulsations frequency was 2,25 and 21,75 Hz respectively) conditions. Mean skin friction and wall heat flux values under stationary conditions were 0,122 N/m² и 460 W/m² respectively. Turbulent pulsations intensity of axial velocity, skin friction and wall heat flux under stationary conditions were $\sigma_U / \bar{U} = 0,015$, $\sigma_{\tau_x} / \bar{\tau}_x = 0,344$, $\sigma_{q_w} / \bar{q}_w = 0,142$, respectively.

In concordance with criterion which was obtained with the help of analysis of order of Prandtl equations terms [6], limiting frequency of external pulsations (a pulsatile flow may be considered as

¹ This research was supported by the Russian Foundation of Basic Researches (grants No.00-02-16409a, 00-15-96690 and 01-02-06212). Ministry of Education (grant of MAI) and Federal Special Program "Integration" (project No.A0012).

quasistationary one if the corresponding frequency of external pulsations is less than the limiting frequency) was:

$$f < L/U_{\infty} \approx 9 \text{ Hz.}$$

Consequently, when frequency of external pulsations was $f=2,25$ Hz in our experiments the flow may be considered as quasistationary one, and when frequency of external pulsations was $f=21,75$ Hz nonstationary effects are possible. More strict classification of pulsatile flows was suggested in [2]. Analysis of mechanism of turbulent kinetic energy transport made it possible to divide all pulsatile flows into five groups. Each group has its own specific features of nonstationarity influence on flow parameters. Boundaries between these groups are functions of two dimensionless numbers: dimensionless frequency of superimposed pulsations $\bar{f} = 2f\bar{\delta} / \bar{U}$, and relative amplitude of axial velocity oscillations $\beta = A_f / \bar{U}$, where f is frequency of pulsations, $\bar{\delta}$ is time-average thickness of pulsatile turbulent boundary layer, \bar{U} is time-average value of friction velocity, \bar{U} and A_f are mean velocity and amplitude of superimposed velocity oscillations in the flow core. Present experimental data belongs to the second ("low-frequency" - $f=2,25$ Hz, $\beta=0,15$) and the fourth ("high-frequency" - $f=21,75$ Hz, $\beta=0,15$) groups of the classification. According to the paper [2] low-frequency pulsating regimes are characterized by appearance of some phase shift of turbulent pulsations due to nonstationarity. But mean velocity profiles are quasistationary. On the contrary, high-frequency pulsating regimes are characterized by essential changes of all flow parameters due to superimposed velocity oscillations.

Analysis of external nonstationarity influence on mean flow parameters showed that nonstationarity didn't effect on mean skin friction and wall heat flux under high-frequency condition. At the same time both parameters slightly decreased under low-frequency condition. Description of the phenomenon (corresponded to skin friction) is known in literature [7]. But changes of mean skin friction and heat flux in the present experiments are comparable with the metering error. Therefore, in order to draw a more definite conclusion it is necessary to repeat these experiments making special arrangements to decrease the metering error.

Intensity of skin friction $\frac{\sigma_{\tau x}}{\bar{\tau}_x}$ and heat flux $\frac{\sigma_{q_w}}{\bar{q}_w}$ pulsations under low-frequency condition became

1,5 and 1,62 times as large, respectively, in comparison with the steady flow. These parameters changed in a different way under high-frequency condition. Relative wall heat flux pulsations slightly increased (11%), whereas relative skin friction pulsations became more than 1,5 times as large.

Space-time correlation functions of velocity and skin friction pulsations $R_{u\tau}$, velocity and heat flux pulsations R_{uq} , heat flux and skin friction pulsations $R_{\tau q}$ were calculated. Maximal value of the correlation coefficient K_{XY} and phase shift of the coefficient's maximum ϕ_{XY} under high-frequency and low-frequency conditions are presented in Table 1. In order to compare these space-time correlation functions were calculated also in the case where the frequencies of external velocity oscillations were cut from signals on skin friction and heat flux. Similar results for the steady regime are presented as well. Negative phase shift ϕ_{XY} means that pulsations of Y-parameter lag behind pulsations of X-parameter.

Above all it should be noted that rigid correlation between wall heat flux and skin friction exists under both frequency conditions. Superimposed nonstationarity has no effect on phase shift between skin friction and heat flux pulsations. Oscillograms of the signals (which are not presented here) confirm this statement. Then, it is interesting that whereas heat flux and skin friction pulsations lag behind axial velocity pulsations (about 30° in every case) under high-frequency condition, at the same time axial velocity pulsations lag behind heat flux pulsations (more than 40°) and skin friction pulsations (9°). No phase shift between skin friction and heat flux pulsations takes place in the last case. As a matter of fact two mechanisms of interaction between skin friction and heat flux pulsations

have an effect on the phase shift value: the first one - at the frequency of external axial velocity oscillations (this effect is weak), and the second one - at the frequency range of turbulent pulsations (this mechanism is dominating). It should be noted that axial velocity oscillations lag behind skin friction pulsations ($5 \div 45^\circ$) in the known experiments [8-10].

Table 1. Maximal correlation coefficient K_{XY} and phase shift of maximal correlation coefficient φ_{XY} of space-time correlation functions $R_{U\tau}$, R_{Uq} and $R_{q\tau}$ of flow parameters

Parameter	Stationary regime	Unfiltered signal		Filtered signal	
		$f=2,25$ Hz	$f=21,75$ Hz	$f=2,25$ Hz	$f=21,75$ Hz
K_{uq}	-	about 0,56	0,44	-	-
φ_{uq}	-	greater than $+40^\circ$	-28°	-	-
$K_{U\tau}$	-	0,56	0,77	-	-
$\varphi_{U\tau}$	-	$+9^\circ$	-31°	-	-
$K_{q\tau}$	0,9	0,86	0,84	0,86	0,86
$\varphi_{q\tau}$	-0,4 ms	-0,4 ms (-0°)	-0,4 ms (-3°)	-0,4 ms (-0°)	-0,4 ms (-3°)

With the help of phase averaging technique some plots of mean and fluctuating skin friction and wall heat flux as functions of axial velocity phase were obtained (Fig. 1-2).

In accordance with [11], friction resistance increases at the phase of flow acceleration. The reversed phenomenon takes place at the phase of flow deceleration. Besides it is common knowledge that acceleration of a turbulent boundary layer leads to laminarization and deceleration of a turbulent boundary layer causes an increase of turbulence intensity. As it is shown in Figs.1 and 2, these rules play an important role at high-frequency condition: form of phase averaged skin friction and heat flux plots is close to a sinusoid which has a phase lag behind external velocity oscillations (30°). Maximum of turbulent skin friction pulsations intensity corresponds with the flow deceleration phase with the same phase shift.

The situation is more complicated in the case of low-frequency regime. One can notice practically no phase shift between skin friction and axial velocity pulsations if only form of the plots of conditional averaged mean and pulsation characteristics of these parameters is taken into account. But the form of conditional averaged skin friction and heat flux as functions of phase angle changes greatly. The part of the plots, which is above line $\langle \tau_x \rangle / \bar{\tau}_x = \langle q_w \rangle / \bar{q}_w = 1$, is only 1/3 of the whole phase angle range (instead of 1/2 of the whole range in the case of high-frequency regime). Maximal turbulent skin friction pulsations take place during the first stage of flow braking under low-frequency condition. Character of mean and fluctuating components of skin friction and heat flux changes depending on phase angle was similar under both unsteady conditions. Also practically no phase shift between these parameters was registered. Order of integral time scale of skin friction and heat flux pulsations (the frequency of external oscillations was cut off the signals) agrees with the order of integral time scale of the parameters in the steady turbulent boundary layer (5,56 and 3,66 ms in the case of heat flux and skin friction fluctuations, respectively). Linear integral scale of skin friction under steady condition was about the order of dynamic boundary layer thickness. Taking into account that cutting off the frequency of superimposed velocity oscillations in the case of skin friction and heat flux signals practically doesn't effect on maximal coefficient of correlation between these parameters (see Table 1) we can suggest that the mechanism of interaction between skin friction and wall heat flux pulsations in pulsatile flows is connected with frequencies of namely turbulent fluctuations.

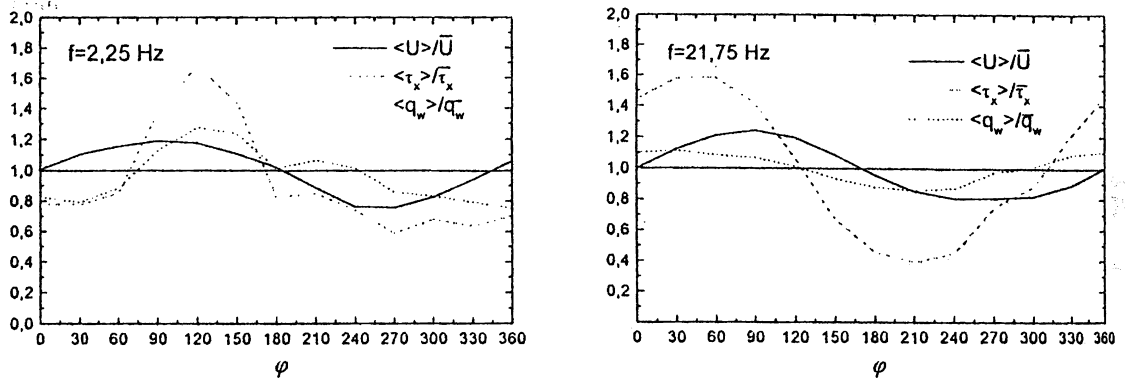


Fig.1. Relative mean characteristics of skin friction $\langle \tau_x \rangle / \bar{\tau}_x$ and wall heat flux $\langle q_w \rangle / \bar{q}_w$ as functions of axial velocity oscillation phase φ under low-frequency ($f=2,25$ Hz) and high-frequency ($f=21,75$ Hz) conditions

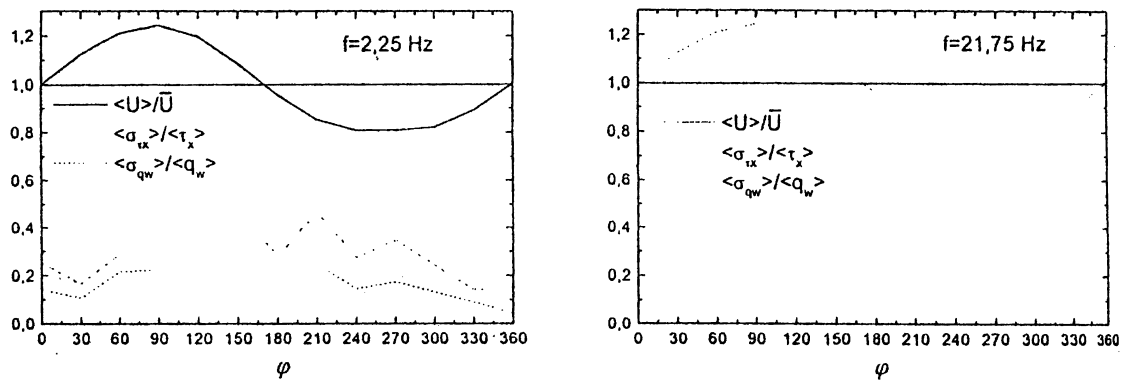


Fig.2. Relative fluctuating characteristics of skin friction $\langle \sigma_{\tau_x} \rangle / \langle \tau_x \rangle$ and wall heat flux $\langle \sigma_{q_w} \rangle / \langle q_w \rangle$ as functions of axial velocity oscillation phase φ under low-frequency ($f=2,25$ Hz) and high-frequency ($f=21,75$ Hz) conditions

So, wall flow parameters τ_x and q_w follow external velocity oscillations in the flow core with some phase shift which depends on frequency of external pulsations under low-frequency and high-frequency nonstationary conditions. Intensity of τ_x and q_w pulsations changes essentially corresponding to phase of external velocity oscillations. Besides intensity of τ_x pulsations 2...3 times as large than intensity of q_w pulsations no matter what a value of phase angle is. It was determined that superimposed nonstationarity doesn't effect on correlation between turbulent pulsations of τ_x and q_w . Rigid correlation between these parameters takes place in a pulsatile flow as well as in a stationary one. The maximal value of the correlation coefficient was more than 0,8. Nearly zero phase shift took place in this case.

Literature

1. Cousteix J., Desopper A., Houdeville R. Structure and development of a turbulent boundary layer in oscillating external flow. In: Turbulent shear flows. P.I. Moscow. 1982. Pp.159-177 [Russian translation].
2. Grigoriev M.M., Kuzmin V.V., Fafurin A.V. Classification of pulsatile flows. Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal. 1990. Vol.59. №5. Pp.725-735 [in Russian].
3. Diatian R.E. Heat exchange in turbulent flows with external periodic velocity nonstationarity. Author's summary of candidate's of technical sciences dissertation. Kiev. Institute of Technical Physics of Heat. 1991 [in Russian].
4. Kozlov A.P., Mikheyev N.I., Stinskii G.V., Soukhotoukov O.V. Influence of external velocity pulsations on instantaneous skin friction vector. Aviatsionnaia Tekhnika. 1999. №3. Pp.51-53 [in Russian].
5. Davletshin I.A. Interaction of impulse and heat transport processes in a turbulent separated flow. Author's summary of candidate's of technical sciences dissertation. Kazan State Technical University. Kazan. 2001 [in Russian].
6. Eckert E.R.G., Drake R.M. Heat and mass transfer. Moscow-Leningrad. Gosenergoizdat. 1961 [Russian translation].
7. Kirmse R.E. Investigations of pulsating turbulent pipe flow. Trans. ASME. J.Fluids Eng. 1979. Vol.101. №4. P.436-442.
8. Cousteix J., Houdeville R., Javelle J. Response of turbulent boundary layer to a pulsation of the external flow with and without adverse pressure gradient. In: Unsteady Turbulent Shear Flows. Symp. Toulouse, 1981. Berlin. Springer. 1981. P.120-144.
9. Kita I., Adachi I., Hirose K. Periodically oscillating turbulent flow in a pipe. Bull. of the JSME. 1980. V.23. №179. P.656-664.
10. McCroskey W.J. Some current research in unsteady fluid dynamics - the 1976 Freeman scholar lecture. Trans. of the ASME. 1977. Vol.99. №1. Pp.93-130 [Russian translation].
11. Daily J.W., Hankey W.L., Olive R.W., Jordaan J.M. Resistance coefficients for accelerated and decelerated flows through smooth tubes and orifices. Trans. of the ASME. 1956. Vol.78. №5. P.1071-1077.