

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РАН
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе

XXVI СИБИРСКИЙ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ СЕМИНАР

17-19 июня 2002 г., Новосибирск

Тезисы докладов

Новосибирск, 2002

АНАЛОГИЯ РЕЙНОЛЬДСА В НЕСТАЦИОНАРНОМ ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ

Алемасов В.Е., Занько Ф.С., Михеев Н.Н., Молочников В.М., Стинский Г.В.

Отдел энергетики Казанского научного центра РАН

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 применимы и в лучшем случае может быть распространен лишь на квазистационарные режимы.

В настоящее время для нестационарного турбулентного пограничного слоя более исследованной является его кинематическая структура. Известны экспериментальные данные Букресева и Шахина, Григорьева и Фафурина, Рамапряна и Ту, Ачария и Рейнольдса, Кусто, Карлессона, Париха, Симпсона, Хартнера, Мизунины, Шемера, Пгучи и др. С учетом сложности и многообразия эффектов влияния нестационарности на кинематическую структуру потока предпринят ряд попыток классификации нестационарных течений. Наиболее полными являются классификации по Рамапряну и Ту, Григорьеву и Фафурину. 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 получены Дрейпером, Кошкиным, Калининским, Бухаркиным, Красным и др. 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. Кроме того, одновременные измерения параметров выполнялись лишь в одной точке. При таком подходе исчезает из рассмотрения пространственно-временная взаимосвязь параметров и эволюция турбулентных структур.

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. В пограничном слое пульсирующего потока с теплообменом происходит непрерывное изменение полей температур и скорости. В турбулентном течении перестройка этих полей влечет за собой непрерывное изменение турбулентной вязкости и теплопроводности. В зависимости от соотношения между характерным временем упомянутых процессов и наложенной нестационарности проявления нестационарных эффектов переноса импульса и теплоты весьма многообразны. С учетом зависимости свойств переноса и плотности газа от температуры нестационарный пограничный слой чувствителен также к неизотермичности потока.

Выполнены комбинированные измерения мгновенных локальных величин теплового потока в стенку, напряжения трения на стенке, температуры и скорости потока в пограничном слое и в ядре потока при различной частоте и интенсивности наложенных гармонических пульсаций. Условия экспериментов охватывали практически весь диапазон режимов гидродинамической нестационарности – от квазистационарных до высокочастотных.

Эксперименты проводились в рабочем участке аэродинамической трубы разомкнутого типа, подключенной к установке для создания пульсирующего воздушного потока. 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 $\delta \approx 12$ 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, разработанного авторами. Принцип его работы основан на измерении градиента температуры и скорости в пределах толщины вязкого подслоя пограничного слоя. Измерительный объем по нитям датчика составлял $2\text{ мм} \times 2\text{ мм} \times 0,1\text{ мм}$, а 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. Многониточный миниатюрный датчик для измерения скорости и температуры потока вводился в пограничный слой со стороны противоположной стенки рабочего участка. Скорость на оси трубы измерялась однопиточным 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 кГц. Одно измерение длилось 4 с. По каналам измерения скорости потока и поверхностного трения использовались дополнительные нити для термокомпенсации. Измерение динамической составляющей градиента давления выполнялось при помощи акустической аппаратуры RFT. 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.

При анализе экспериментальных данных использовался метод условного осреднения. Получены закономерности изменения по фазе наложенных пульсаций нестационарной (условно средней) и турбулентной составляющих параметров потока, информация об интенсивности турбулентности, функциях совместного распределения и взаимных пространственно-временных корреляциях параметров в различных фазах наложенных пульсаций. Привязка результатов измерений параметров на стенке и на различных расстояниях от стенки к фазе пульсаций внешнего потока позволила представить экспериментальные данные в виде пространственно-временных полей условных средних значений и интенсивности турбулентных пульсаций гидродинамических и тепловых параметров. По сути дела, экспериментально получены данные, по форме представле-

ния соответствующие результатам интегрирования нестационарных уравнений движения и энергии в форме Рейнольдса.

Выявлен существенный сдвиг между фазой пульсаций внешнего потока и фазами условно средних значений параметров потока в пограничном слое. Угол фазового сдвига зависит от относительного расстояния от стенки и безразмерной частоты наложенных пульсаций. Интенсивность турбулентных пульсаций параметров, кроме того, существенно изменяется по фазе пульсаций. Фазы же турбулентных пульсаций теплового потока в стенку и поверхностного трения достаточно близки между собой.

Полученные экспериментальные данные позволяют сформулировать более четкие представления о турбулентном теплопереносе в условиях гидродинамической нестационарности. Достаточно перспективным представляется использование этих данных в обратной задаче нестационарного пограничного слоя с целью получения экспериментальной информации о турбулентной вязкости и теплопроводности, а также турбулентном числе Прандтля в зависимости от факторов нестационарности потока.

АНАЛОГИЯ РЕЙНОЛЬДСА В НЕСТАЦИОНАРНОМ ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ

В.Е.Алемасов, Ф.С.Занько, Н.И.Михеев, В.М.Молочников, Г.В.Стинский

Отдел энергетики Казанского научного центра РАН, Казань, alemasov@sci.kcn.ru

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 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. Рассмотрены закономерности изменения по фазе наложенных пульсаций профиля скорости и интенсивности турбулентности в нестационарном турбулентном пограничном слое для двух высокочастотных режимов. Представляется перспективным использование этих данных в обратной задаче нестационарного пограничного слоя с целью получения экспериментальной информации о турбулентной вязкости в зависимости от параметров нестационарности потока.

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 Букреева, Шахина (1976), Рамапряна, Ту (1983), Ачария, Рейнольдса (1975), Кусто и др. (1982), Карлссона (1959), Париха и др. (1983), Симпсона и др. (1981), Хартнера (1984), Мизушины и др. (1975), Шемера и др. (1985), Игучи и др. (1985) и пр. 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 (1983), Григорьеву и др. (1990). 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., Калинин Э.К., Бухаркиным В.Б., Краевым Б.М. и др. (см., например, Кошкин и др (1973), Дрейцер и др. (1997)). 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. Кроме того, одновременные измерения параметров выполнялись лишь в одной точке. При таком подходе исчезает из рассмотрения пространственно-временная взаимосвязь параметров и эволюция турбулентных структур.

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. В пограничном слое пульсирующего потока с теплообменом происходит непрерывное изменение полей температуры и скорости. В турбулентном течении перестройка этих полей влечет за собой непрерывное изменение турбулентной вязкости и теплопроводности. В зависимости от соотношения между характерным временем упомянутых процессов и наложенной нестационарности проявления нестационарных эффектов переноса импульса и теплоты весьма многообразны. С учетом зависимости свойств переноса и плотности газа от температуры нестационарный пограничный слой чувствителен также к неизотермичности потока.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Выполнены комбинированные измерения мгновенных локальных величин теплового потока в стенку, напряжения трения на стенке, а также скорости потока в пограничном слое и в ядре потока при различной частоте и интенсивности наложенных пульсаций. Условия экспериментов 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 Козлова и др. (1999). 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°С. Комбинированные измерения удельного теплового потока в стенку и поверхностного трения выполнялись при помощи широко апробированного нового датчика (см., напр., Давлетшин (2001)), разработанного авторами. Принцип его основан на измерении

градиента температуры и скорости в пределах толщины вязкого подслоя пограничного слоя. Измерительный объем по нитям датчика $2\text{мм} \times 2\text{мм} \times 0,1\text{мм}$, 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. Двухниточный миниатюрный датчик для измерения скорости потока вводился в пограничный слой со стороны противоположной стенки рабочего участка. Скорость на оси трубы измерялась одониточным 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 каналам измерения скорости потока и поверхностного трения использовались дополнительные нити 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 $\bar{U} \approx 5 \text{ м/с}$ 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 $0,1 \text{ Н/м}^2$ и 350 Вт/м^2 соответственно. Интенсивность пульсаций осевой скорости, поверхностного трения и теплового потока в стенку в стационарном режиме составляла $\sigma_U / \bar{U} = 0,01$, $\sigma_{\tau_x} / \bar{\tau}_x = 0,352$, $\sigma_{q_w} / \bar{q}_w = 0,124$, соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

В соответствии с предложенной Григорьевым и др. (1990) классификацией пульсирующих потоков представленные в работе режимы течения можно отнести к "низкочастотной" ($f=5 \text{ Гц}$, $\beta=0,22$) и "высокочастотной" ($f=20 \text{ Гц}$, $\beta=0,05$; $f=40 \text{ Гц}$, $\beta=0,09$; $f=60 \text{ Гц}$, $\beta=0,06$) группам. Границы между группами задаются 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. Согласно работе Григорьева и др. (1990), 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 средние профили скорости, среднюю величину поверхностного трения и теплового потока в стенку на всех частотных режимах. Вообще говоря, в работе Ту, Рамапряна (1983), например, было отмечено влияние наложенной нестационарности на средний профиль скорости по крайней мере на некоторых частотных режимах. Что

касается поверхностного трения, то здесь данные разных авторов сильно расходятся. В экспериментах Томаса, Шуклы (1976) среднее трение в пульсирующем потоке оказалось меньше своего квазистационарного аналога. По данным Калишевского, Селиховкина (1967), Седача, Дядичева (1970), Бэйрда и др. (1971) наложенная нестационарность не влияет на среднюю величину трения. Если же судить по результатам Букреева, Шахина (1977), Кирмсе (1979) и Ту, Рамапряна (1983), то среднее трение в пульсирующем течении увеличивается на 2-15% по сравнению с квазистационарным случаем, причем это отклонение растет с увеличением амплитуды пульсаций потока (Ту, Рамапряна (1983)). 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.

Первое представление о характере влияния наложенной нестационарности на структуру течения можно получить из рассмотрения осциллограмм скорости и поверхностного трения на низкочастотном и высокочастотном режимах (рис.1). Следует отметить, что сигналы в разных точках по высоте получены не одновременно, но синхронизированы по фазе пульсаций скорости на оси канала. Ясно видно, что при низкочастотном режиме ($f=5$ Гц, $\beta=0,22$) внешняя область пограничного слоя ($y \geq 2$ мм) совершает вынужденные колебания примерно с той же амплитудой, что и ядро потока ($A \approx 1,25$ м/с). В пристеночной области ($y=0,5$ мм) и даже на осциллограмме поверхностного трения также можно визуально выделить внешнюю нестационарность, но уже с меньшей амплитудой ($A \approx 0,5$ м/с). На высокочастотном режиме ($f=40$ Гц, $\beta=0,09$) внешние колебания потока прослеживаются лишь в самой внешней части пограничного слоя ($y=7$ мм). На меньшем расстоянии от стенки они становятся незаметными, так как амплитуда вынужденных колебаний ядра потока ($A \approx 0,5$ м/с) мала по сравнению с турбулентными пульсациями в этой области.

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 $0,8 \div 0,9$ без какого-либо фазового сдвига.

При анализе экспериментальных данных использовался широко известный и многократно описанный в литературе метод условного фазового усреднения. На рис.2 и 3 показаны закономерности изменения по фазе наложенных пульсаций профиля скорости и интенсивности турбулентности в нестационарном турбулентном пограничном слое для двух высокочастотных режимов ($f=40$ Гц, $\beta=0,09$; $f=60$ Гц, $\beta=0,06$). Условно усредненные профили скорости и интенсивности турбулентности представлены в относительном виде для значений фазового угла 90 и 270°. Отметим, что условно усредненные параметры относились при этом к своим безусловным аналогам на том же режиме.

Видно, что условно усредненный профиль скорости испытывает на протяжении одного периода наложенных пульсаций существенные деформации: амплитуда его колебаний относительно безусловно среднего профиля составляет величину порядка 5-10%. Еще больше влияние наложенной нестационарности на величину поверхностного трения. Его отклонение от безусловно среднего значения может превышать 25%. Так как ускорение частиц, близких к стенке, сравнительно мало, то именно здесь влияние дополнительного градиента давления проявляется сильнее.

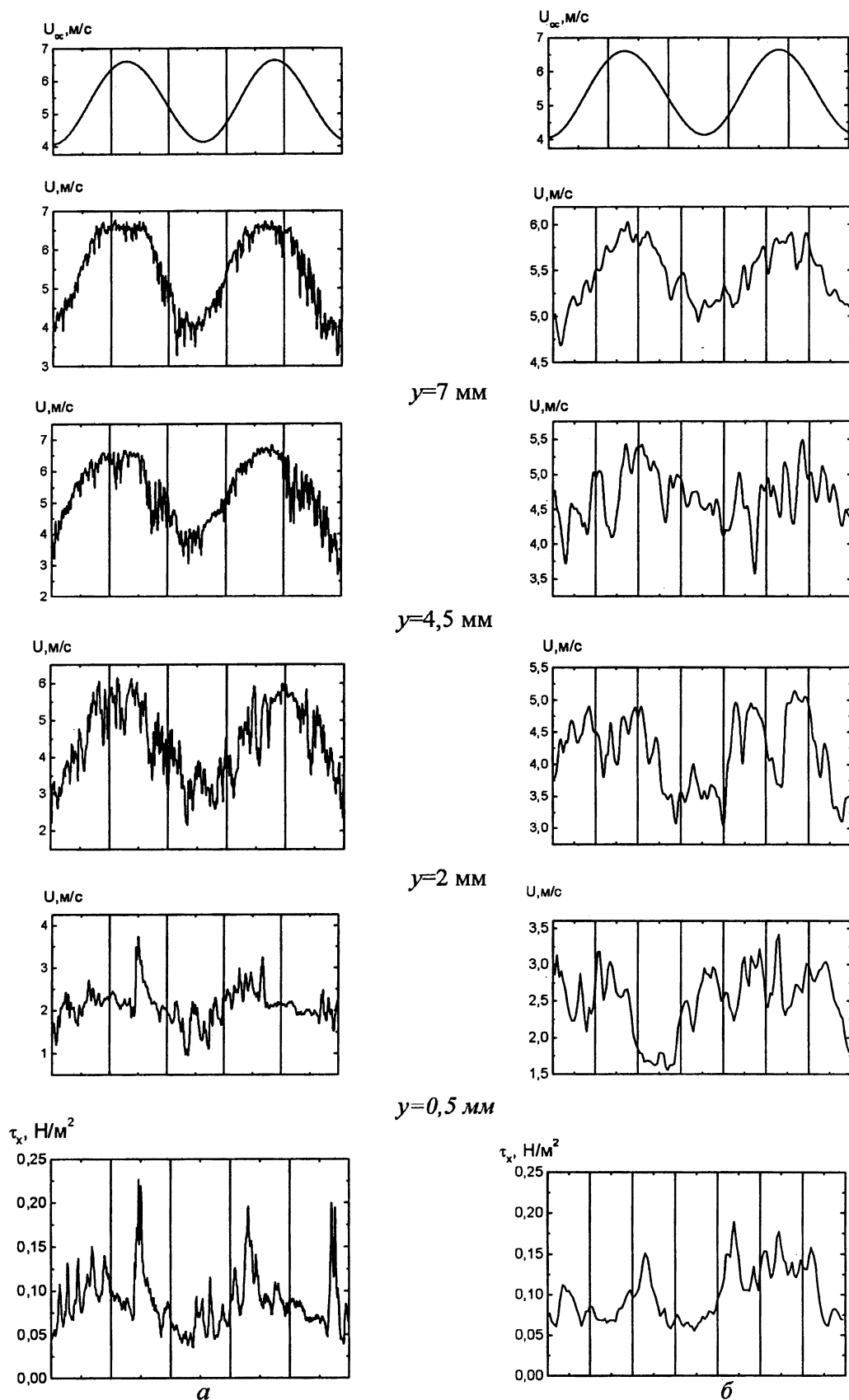


Рис.1. Осциллограммы скорости и поверхностного трения: *a* - $f=5$ Гц, *б* - $f=40$ Гц

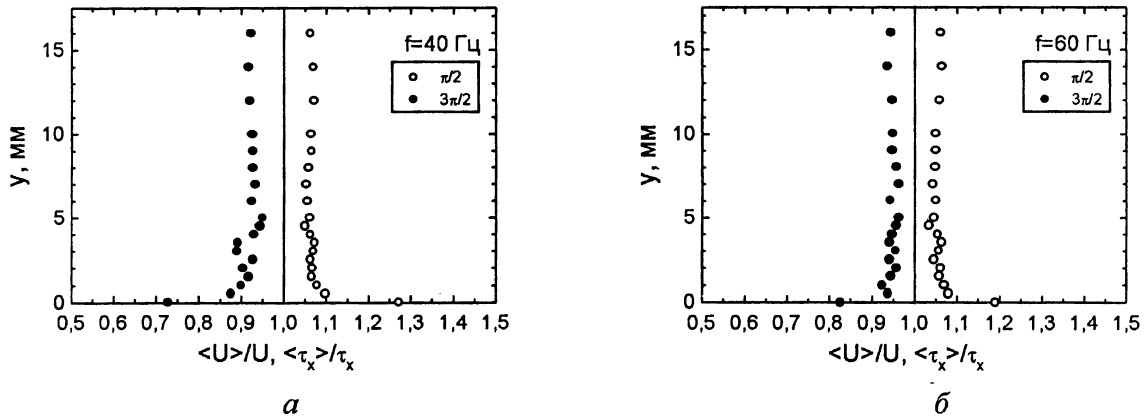


Рис.2. Относительные условно усредненные профили скорости: а - $f=40$ Гц, б - $f=60$ Гц

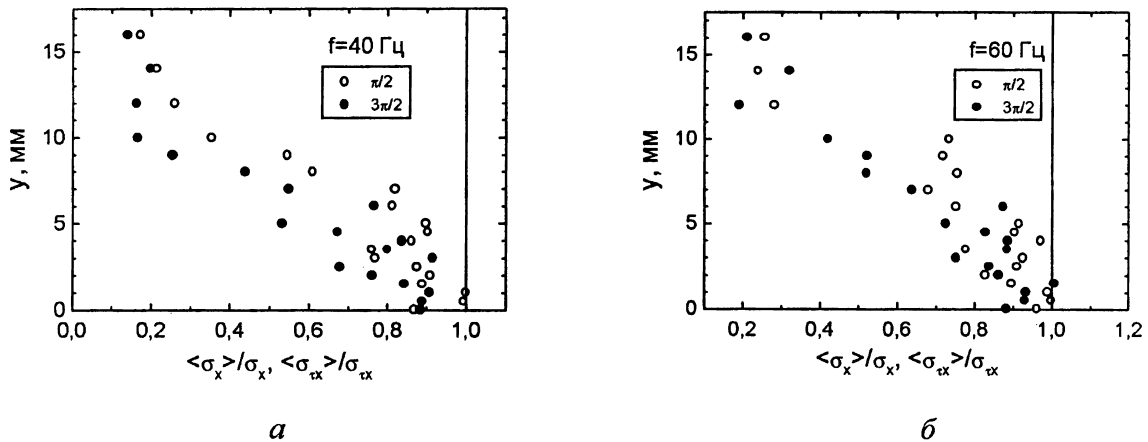


Рис.3. Относительные условно усредненные профили интенсивности турбулентности: а - $f=40$ Гц, б - $f=60$ Гц

Данные по условно усредненному профилю интенсивности турбулентности носят, скорее, качественный характер. Тем не менее, следует констатировать, что влияние наложенных пульсаций падает с приближением к стенке. На поверхности стенки $\langle \sigma_x \rangle / \sigma_x$ и $\langle \sigma_{\tau x} \rangle / \sigma_{\tau x}$ практически равны 1, следовательно, фазовое усреднение дает результат, не отличающийся от безусловного усреднения. Это означает, что у стенки наложенные пульсации полностью "поглощаются" турбулентными. С другой стороны, малые значения $\langle \sigma_x \rangle / \sigma_x$ во внешних слоях пограничного слоя свидетельствуют о том, что турбулентное перемешивание в этой области мало, и почти вся безусловная интенсивность турбулентности создается за счет наложенных пульсаций. (Фазовое усреднение приводит к тому, что доля σ_x , создаваемая внешней нестационарностью, "вырезается", и, например, в ядре потока условно усредненный параметр оказывается существенно меньше своего безусловного аналога).

Привязка результатов измерений параметров на стенке и на различных расстояниях от стенки к фазе пульсаций внешнего потока в принципе позволяет представить экспериментальные данные в виде пространственно-временных полей условных средних значений и интенсивности турбулентных пульсаций гидродинамических и тепловых параметров. По сути дела, экспериментально получены данные, по форме представления

соответствующие результатам интегрирования нестационарных уравнений движения в форме Рейнольдса.

Полученные экспериментальные данные позволяют сформулировать более четкие представления о турбулентном теплопереносе в условиях гидродинамической нестационарности. Достаточно перспективным представляется использование этих данных в обратной задаче нестационарного пограничного слоя с целью получения экспериментальной информации о турбулентной вязкости в зависимости от факторов нестационарности потока.

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".

ЛИТЕРАТУРА

Букреев В.И., Шахин В.М. (1976). Экспериментальное исследование турбулентного неустановившегося течения в круглой трубе. *Аэромеханика*, Наука, Москва, 180-187.

Букреев В.И., Шахин В.М. (1977). Сопротивление трения и потери энергии при турбулентном пульсирующем течении в трубе. *Известия АН СССР. Механика жидкости и газа* 1, 160-162.

Григорьев М.М., Кузьмин В.В., Фафурин А.В. (1990). Классификация пульсирующих турбулентных течений. *Инженерно-физический журнал* 59:5, 725-735.

Давлетшин И.А. (2001). Взаимосвязь процессов переноса импульса и теплоты в турбулентном отрывном течении. *Автореф. дис. ... канд. техн. наук*, КГТУ им.А.Н.Туполева, Казань.

Калишевский Л.Л., Селиховкин С.В. (1967). Некоторые результаты исследования нестационарного турбулентного движения. *Теплоэнергетика* 1, 69-72.

Кирмсе (1979). Исследование пульсирующего турбулентного течения в трубе. *Тр. амер. общ-ва инж.-механиков. Теоретические основы инженерных расчетов*, серия D, 101:4, 139-146.

Кошкин В.К., Калинин Э.К., Дрейцер Г.А. и др. (1973). *Нестационарный теплообмен*, Машиностроение, Москва.

Кусто Ж., Дезопер А., Худевиль Р. (1982). Структура и развитие турбулентного пограничного слоя в осциллирующем внешнем потоке. *Турбулентные сдвиговые течения I*, Машиностроение, Москва, 159-177.

Парих П.Г., Рейнольдс В.К., Джаяраман Р. (1983). Характеристики нестационарного турбулентного пограничного слоя. *Аэрокосмическая техника* 1:1, 73-80.

Седач В.С., Дядичев Е.М. (1970). Определение потерь при пульсирующем течении газа. *Известия вузов. Энергетика* 10, 106-111.

Томас, Шукла (1976). Теоретическое и экспериментальное исследование периодичности турбулентного пульсирующего течения в пристенной области. *Тр. амер. об-ва инж.-механиков. Теоретические основы инженерных расчетов*, серия D, **98:1**, 134-139.

Acharya M., Reynolds W.C. (1975). Measurements and predictions of a fully developed turbulent channel flow with imposed controlled oscillations. *Stanford Univ. Thermosci. Div. Tech. Rep. TF-8*.

Baird M.H.I., Round G.F., Cordenas J.N. (1971). Friction factors in pulsed turbulent flow. *The Canadian Journal of Chemical Engineering* **49:4**, 220-223.

Dreitser G.A., Bukharkin V.B., Kraev B.M., Neverov A.S. (1997). Experimental study of the effect of hydrodynamic unsteadiness on a turbulent tube gas flow structure. *Turbulence, Heat and Mass Transfer 2*, Delft Univ. Press, Netherlands, 269-278.

Hartner E. (1984). Turbulenzmessung in pulsierender rohrstroemung. *Diss. Doktor, Techn. Univ. Muenchen*.

Iguchi M., Ohmi M., Tanaka S. (1985). Experimental study of turbulence in a pulsatile pipe flow. *Bull JSME* **28:246**, 2915-2922.

Karlsson S.K.F. (1959). An unsteady turbulent boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics* **5:4**, 622-636.

Mizushina T., Maruyama T., Hirasawa H. (1975). Structure of the turbulence in pulsating pipe flow. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, **8:3**, 210-216.

Ramaprian B.R., Tu S.W. (1983). Fully developed periodic turbulent pipe flow. Part 2. The detailed structure of the flow. *Journal of Fluid Mechanics* **137**, 59-81.

Shemer L., Wygnanski I., Kit E. (1985). Pulsating flow in a pipe. *Journal of Fluid Mechanics* **153**, 313-337.

Simpson R.L., Shivaprasad B.G., Chew I.T. (1981). Some features of unsteady separating turbulent boundary layers. *IUTAM Symp. Unsteady Turbulent Shear Flows, Toulouse, France, 1981*, Springer, Berlin, 109-119.

Tu S.W., Ramaprian B.R. (1983). Fully developed periodic turbulent pipe flow. Part 1. Main experimental results and comparison with predictions. *Journal of Fluid Mechanics* **137**, 31-58.