

*В.Е.Алемасов<sup>2</sup>, И.А.Давлетишин<sup>1</sup>, Н.И.Михеев<sup>2</sup>, В.М.Молочников<sup>2</sup>, Д.И.Романов<sup>2</sup>*

Казанский государственный технический университет им.А.Н.Туполева, Россия (1)  
Исследовательский центр проблем энергетики КазНЦ РАН, Казань, Россия (2)

## ТЕПЛОВЫЕ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПУЛЬСИРУЮЩИХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЯХ В КАНАЛАХ

### АННОТАЦИЯ

Представлены результаты экспериментального исследования взаимосвязи поверхностного трения и теплового потока в турбулентном пограничном слое с наложенными пульсациями скорости потока на его внешней границе, а также пространственно-временной структуры развитого турбулентного течения воздуха в круглой трубе в условиях периодических пульсаций расхода. Получены данные по зависимости гидравлического сопротивления трубы от частоты пульсаций расхода. Выявлено наличие резонансных явлений в трубе, которые оказывают существенное влияние на структуру течения.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Пульсации параметров потока оказывают влияние на режимные характеристики различных технических устройств: изменяется гидравлическое сопротивление каналов, интенсифицируются или ослабляются теплообменные процессы, возрастает погрешность измерения и контроля параметров и т.д. Влияние факторов нестационарности на тепловые и гидродинамические процессы весьма многообразно и зависит как от диапазона изменения этих факторов, так и от конфигурации течения и режима работы оборудования. В связи с этим были предприняты многочисленные попытки классификации нестационарных течений. Наиболее полными являются классификации по Рамапрану и Ту [1], а также по М.Григорьеву и А.Фафурину [2], в которых на основе анализа механизма распространения турбулентности выделено пять различных форм проявления влияния наложенных пульсаций на характеристики течения.

Несмотря на возросший интерес исследователей к изучению проблемы нестационарности, на сегодняшний день нет ясного представления о механизмах влияния пульсаций потока на гидродинамические и тепловые процессы.

Наиболее изученной считается кинематическая структура нестационарного пограничного слоя [3—5]. Систематические экспериментальные и теоретические исследования нестационарных турбулентных течений на переходных режимах (монотонное увеличение или уменьшение скорости) [6, 7] выявили существенное влияние ускорения и замедления потока на профили осредненной скорости и турбулентную структуру пограничного слоя. Некоторые закономерности изменения коэффициентов турбулентного переноса под действием периодической наложенной нестационарности в пограничном слое на стенке канала выявлены в работе [8]. В [9] на

основе анализа экспериментальных данных пульсирующего течения в трубе были получены даже отрицательные значения турбулентной вязкости. Следует отметить, что практически все известные экспериментальные данные получены по результатам измерения параметров только в одном поперечном сечении потока, так что вопросы, связанные с эволюцией пространственно-временной структуры течения под влиянием наложенной нестационарности, остаются на сегодняшний день без ответа.

Исследования нестационарного теплообмена выполнялись крайне редко и, как правило, в достаточно узком диапазоне изменения факторов нестационарности, а полученные результаты зачастую оказывались противоречивыми. Так, в [10—12] показано, что при малой амплитуде пульсаций скорости потока средняя величина коэффициента теплоотдачи при турбулентном течении в трубе практически не изменяется по сравнению со стационарным значением. Если же амплитуда пульсаций достаточно велика, то, по данным различных исследований, коэффициент теплоотдачи может возрастать [11, 13] или уменьшаться [13].

Недостаточное понимание механизмов перестройки гидродинамических и тепловых процессов и изменения характера их взаимосвязи под действием меняющегося по времени и пространству градиента давления (скорости потока) является сдерживающим фактором развития методов моделирования нестационарных течений. Подход, основанный на применении аналогии Рейнольдса и ее модификаций, в лучшем случае применим для квазистационарных режимов течения. Результаты численного моделирования пока недостаточно надежны, в частности, из-за несовершенства моделей турбулентности.

В настоящей работе экспериментально исследуется взаимосвязь гидродинамических и тепловых процессов в турбулентном пограничном слое при наложенных гармонических пульсациях скорости на его внешней границе, а также пространственно-временная структура развитого турбулентного течения в круглой трубе с наложенными гармоническими пульсациями расхода.

### 2. ВЗАИМОСВЯЗЬ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В НЕСТАЦИОНАРНОМ ТУРБУЛЕНТНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

Эксперименты проводились в аэродинамической трубе разомкнутого типа с рабочим участком прямоугольного поперечного сечения 100×130 мм [14].

Расход воздуха через рабочий участок обеспечивался вентилятором, работающим на отсос, а наложенные пульсации скорости потока создавались при помощи специального устройства, основным элементом которого являлась профилированная вращающаяся заслонка, приводимая в движение электроприводом. Устройство создания пульсаций расхода позволяло независимо регулировать частоту и амплитуду наложенных пульсаций.

В экспериментах выполнялись одновременные комбинированные измерения скорости потока на оси рабочего участка (на внешней границе пограничного слоя) и локальных величин теплового потока в стенку и продольной компоненты вектора поверхностного трения. Измерения проводились в пограничном слое, развивающемся на верхней стенке рабочего участка. Стенка была выполнена из тонкого металлического листа и одновременно служила днищем емкости с нагретой водой. В экспериментах поддерживалась постоянная температура стенки, равная 40°C, при этом разность температуры стенки и потока составляла 19°. Измерения выполнялись с использованием нитяного термоанемометрического датчика скорости потока и комбинированного датчика поверхностного трения и теплового потока на стенке [15].

Эксперименты проводились при среднем значении скорости потока на оси канала  $U = 5.8$  м/с и двух значениях частоты наложенных пульсаций скорости  $f = 2.25$  и 21.75 Гц, что соответствовало, согласно классификации [2], второй (низкочастотные) и четвертой (высокочастотные) группам нестационарных течений.

Анализ полученных данных показал, что на обоих нестационарных режимах между пульсациями теплового потока в стенку и поверхностного трения существует жесткая корреляционная связь (величина коэффициента взаимной корреляции сохраняется на уровне  $R_{qt \max} = 0.84 \dots 0.9$ ) при отсутствии заметного фазового сдвига между этими параметрами. Однако между пульсациями скорости потока на внешней границе пограничного слоя и параметрами на стенке (поверхностным трением и тепловым потоком) имеет место фазовый сдвиг. При  $f = 21.75$  Гц пульсации теплового потока и поверхностного трения отстают по фазе от пульсаций скорости приблизительно на одну и ту же величину ( $\varphi_{uq} = \varphi_{ut} \approx -30^\circ$ ), а при  $f = 2.25$  Гц пульсации теплового потока и поверхностного трения опережают пульсации скорости ( $\varphi_{uq} = 40^\circ$  и  $\varphi_{ut} \approx 9^\circ$ ). При этом для  $f = 21.75$  Гц  $R_{ut \max} = 0.77$  и  $R_{uq \max} = 0.44$ , а для  $f = 2.25$  Гц  $R_{ut \max} = R_{uq \max} = 0.56$ . Такой, парадоксальный на первый взгляд, результат объясняется следующим. Для пульсаций поверхностного трения и теплового потока в стенку доминирующим является механизм взаимосвязи на масштабе (частотном диапазоне) турбулентных пульсаций, тогда как механизм взаимосвязи на частоте наложенных пульсаций скорости выражен слабо. Взаимосвязь пульсаций скорости потока на внешней границе погранич-

ного слоя и пульсаций параметров на стенке имеет место только на частоте наложенных пульсаций скорости: при удалении из сигнала по трению и тепловому потоку частоты наложенной нестационарности коэффициенты взаимных корреляций  $R_{ut}$  и  $R_{uq}$  принимали нулевые значения. Характер этой взаимосвязи зависит от сложной пространственно-временной структуры течения и теплообмена. Ее изучение требует дополнительных экспериментальных исследований.

На рис.1 представлены зависимости условных средних значений относительного напряжения трения  $\langle \tau_x \rangle / \bar{\tau}_x$  и теплового потока на стенке  $\langle q_x \rangle / \bar{q}_x$ , а на рис. 2 — относительных среднеквадратичных пульсаций этих параметров  $\langle \sigma_{\tau_x} \rangle / \bar{\tau}_x$  и  $\langle \sigma_{q_x} \rangle / \bar{q}_x$  от фазы наложенных пульсаций скорости. Как видно из рисунков, при  $f = 21.75$  Гц в фазе ускорения потока сопротивление трения возрастает, а при торможении — снижается.

Максимум интенсивности турбулентных пульсаций трения и теплового потока соответствует фазе торможения потока со сдвигом по фазе приблизительно 30°. На низкочастотном режиме ( $f = 2.25$  Гц) максимум  $\langle \tau_x \rangle / \bar{\tau}_x$  и  $\langle q_x \rangle / \bar{q}_x$ , а также максимум пульсаций этих параметров имеет место в начальной фазе торможения потока.

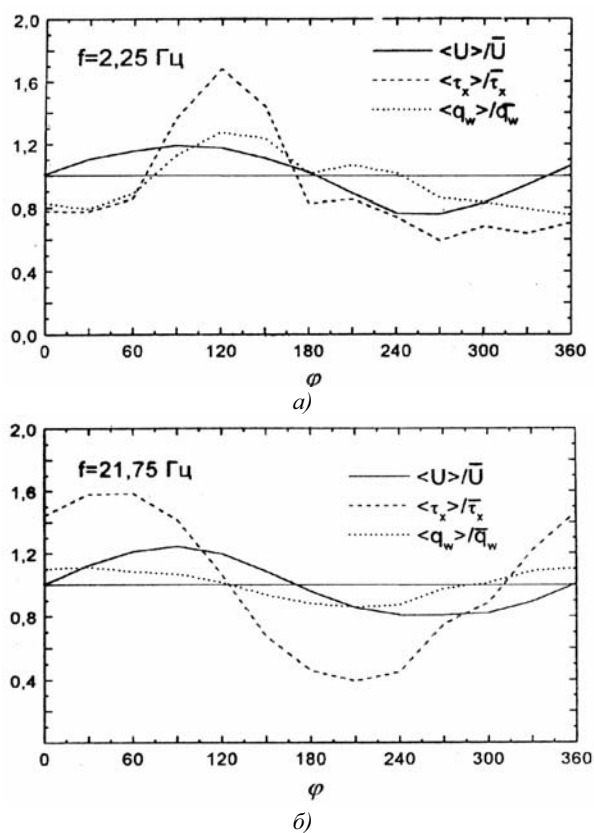


Рис.1. Зависимость условных средних значений относительного напряжения трения и теплового потока на стенке от фазы пульсаций скорости на внешней границе пограничного слоя: а —  $f = 2.25$  Гц; б — 21.75 Гц

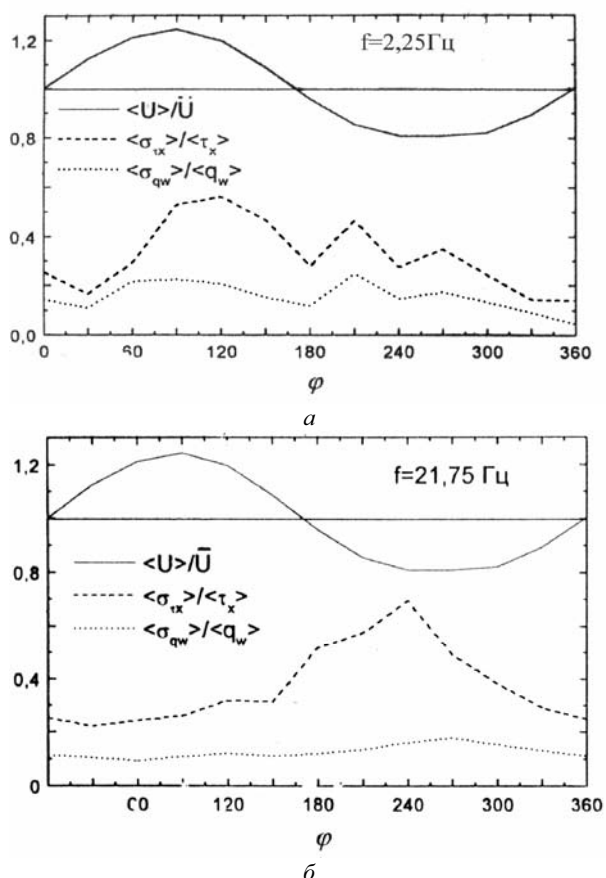


Рис.2. Зависимость относительных среднеквадратичных пульсаций напряжения трения и теплового потока на стенке от фазы пульсаций скорости на внешней границе пограничного слоя: а — 2.25 Гц; б — 21.75 Гц

Оценка влияния наложенной нестационарности на осредненную величину поверхностного трения и теплового потока на стенке, выполненная в рамках проведенных исследований, показала, что при  $f = 21.75$  Гц оба этих параметра практически не отличаются от соответствующих стационарных значений, а при  $f = 2.25$  Гц несколько ниже этих значений. Однако полученные в настоящих экспериментах различия сопоставимы с погрешностью измерений.

### 3. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА И СОПРОТИВЛЕНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ В ТРУБЕ С НАЛОЖЕННОЙ НЕСТАЦИОНАРНОСТЬЮ

С учетом полученных результатов проведение дальнейших исследований предусматривало обеспечение более высокой точности задания и поддержания осредненной скорости потока (расхода воздуха через рабочий участок) и частоты наложенных пульсаций, возможности одновременного измерения мгновенных величин параметров течения и теплообмена в двух сечениях потока, а также измерения продольного распределения среднего коэффициента теплоотдачи. С этой целью была разработана новая экспериментальная установка, схема которой представлена на рис. 3.

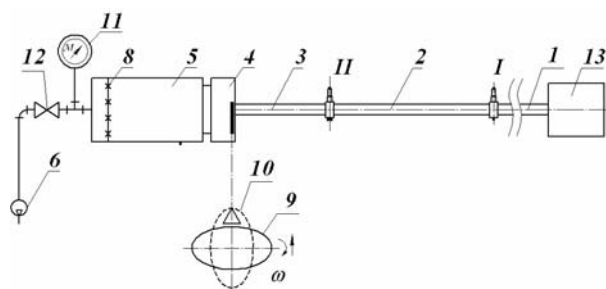


Рис.3. Схема экспериментальной установки

Установка включала рабочий участок (круглая гидравлически гладкая труба с внутренним диаметром  $d = 64$  мм и толщиной стенки 8 мм, выполненная из стали 1X18H10T), устройство для создания пульсаций расхода 4 и ресивер 5. Средний по времени расход воздуха в рабочем участке создавался турбокомпрессором 6, работающим на всасывание, и поддерживался постоянным (в одной серии измерений) при помощи критических сопел 7, установленных на герметичном фланце 8 ресивера 5. В экспериментах использовались поверенные критические сопла, обеспечивающие значение расхода с погрешностью не более 0.25%. Основным элементом устройства для создания пульсаций расхода 4 являлась вращающаяся заслонка эллиптической формы 9, приводимая во вращение электроприводом с регулируемой и стабилизируемой частотой вращения, и периодически перекрывающая входное отверстие 10. Предвключенный участок 1 установки имел длину  $L_0 = 5$  м (78 калибров) или  $L_0 = 7$  м (109 калибров), что в обоих случаях обеспечивало на стационарном режиме развитое турбулентное трубное течение в измерительном участке установки. На входе в рабочий участок предусматривалась установка малоинерционного нагревателя воздуха 13 мощностью 32кВт с устройством выравнивания температурного поля.

Установка позволяла проводить на границах I и II измерительного участка одновременные измерения перепада статического давления  $\Delta P$ , его пульсационной составляющей  $p'$ , профилей скорости  $u(y)$  и температуры  $T(y)$  потока, а также мгновенных значений теплового потока на стенке  $q_w$  и продольной компоненты вектора поверхностного трения  $\tau_x$ . Кроме того, измерительный участок был снабжен системой термопар, установленных на его наружной поверхности. При проведении измерений с теплообменом обеспечивалась надежная теплоизоляция этой поверхности. В дальнейшем зависимость этой температуры от времени при поступлении нагретого воздуха в рабочий участок установки использовалась в методике определения продольного распределения среднего коэффициента теплоотдачи, основанной на решении обратной задачи нестационарной теплопроводности [16].

В измерениях использовались U-образный манометр, микрофоны и акустическая аппаратура RFT, нитяной термоанемометрический датчик и термоанемометрический датчик продольной компоненты вектора поверхностного трения [15], новый

градиентный датчик теплового потока совместно с термоанемометрической аппаратурой DISA 55M и новым термометрическим блоком.

В рамках представленной работы ограничимся изложением основных результатов по влиянию наложенной нестационарности только на гидродинамические процессы при турбулентном течении в трубе.

Эксперименты проводились при числах Рейнольдса  $Re = (0.7 \dots 1.5) \times 10^5$ , вычисленных по среднерасходной скорости потока и внутреннему диаметру трубы. Установлено, что перепад статического давления  $\Delta P^* = (d/l_x) \Delta P / (\rho \langle U \rangle^2 / 2)$  в трубе не монотонно изменяется по частоте  $f$  наложенных пульсаций расхода (рис.1). Зависимость  $\Delta P^*(f)$  сохраняется при изменении среднего значения расхода и имеет выраженные экстремумы, причем при некоторых значениях  $f$   $\Delta P^* < 0$ . Получено, что на некоторых режимах по  $f$  минимальному значению интенсивности пульсаций скорости потока  $\sigma_u^*$  в сечении I соответствуют максимальные значения интенсивности пульсаций давления в сечении II измерительного участка, и наоборот. Аналогичная закономерность имеет место и для интенсивности среднеквадратичных пульсаций давления  $\sigma_p^*$ , однако области максимального значения  $\sigma_u^*$  (по  $f$ ) практически совпадают с областями минимальных значений  $\sigma_p^*$ , и наоборот.

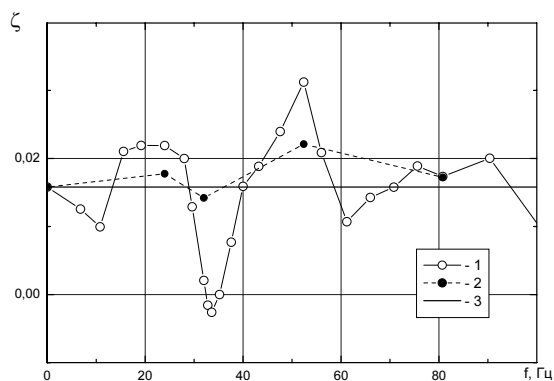


Рис.4. Зависимость перепада статического давления  $\Delta P^*$  (1) и гидравлического сопротивления трубы  $\zeta$  от частоты пульсаций расхода (2). 3 — значение  $\zeta$  на стационарном режиме

Полученные данные свидетельствуют о наличии резонансных явлений в рабочем участке установки, которые являются следствием взаимодействия наложенных пульсаций расхода и собственных акустических колебаний столба воздуха в канале конечной длины (рабочем участке). Резонансные частоты соответствуют различным модам собственных акустических колебаний при граничных условиях, реализованных в эксперименте.

Наличие резонансных явлений вызывает появление стоячих волн в рабочем участке установки, при этом в различных сечениях трубы возникают пучности и узлы давления (скорости потока), при-

чем положение пучностей давления совпадает с положением узлов скорости, и наоборот. Под действием пульсаций давления (скорости потока) происходит деформация средних профилей скорости по сравнению с профилем развитого турбулентного течения на стационарном режиме. Эта деформация неодинакова в различных сечениях трубы. На некоторых резонансных частотах вблизи стенки обнаружены кратковременные возвратные токи.

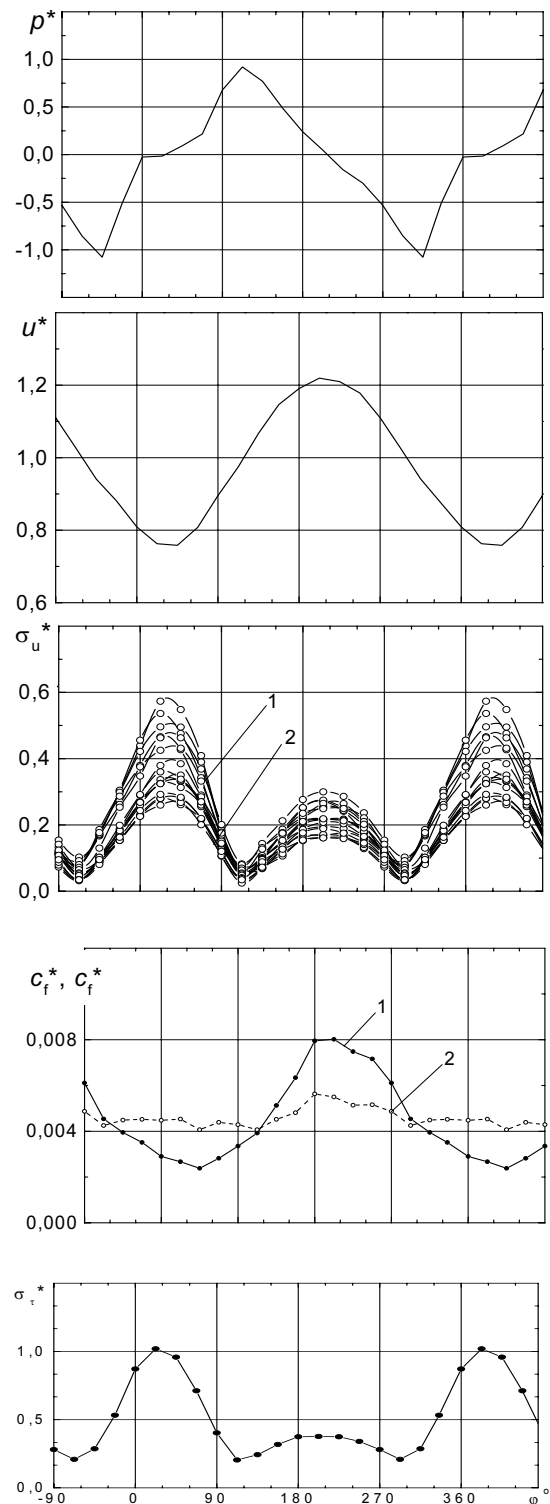


Рис.5. Изменение безразмерных значений условно осредненных параметров течения в сечении II по фазовому углу пульсаций давления в сечении I при  $f=26$  Гц

Зависимость гидравлического сопротивления трубы  $\zeta$  от частоты пульсаций расхода, полученная с учетом изменения количества движения, вызванного деформацией средних профилей скорости потока на нестационарных режимах, показана на рис. 1 (кривая 2). Из рисунка видно, что увеличение сопротивления при некоторых значениях  $f$  может достигать 30%.

По взаимно корреляционным функциям пульсаций параметров течения выполнена оценка уровня взаимосвязи давления, скорости потока на оси трубы и продольной компоненты вектора трения, а также фазового сдвига между ними в сечениях I и II измерительного участка. Кроме того, получено изменение условно средних значений этих параметров по фазовому углу пульсаций давления в сечении I измерительного участка, пример которых для  $f = 26$  Гц приведен на рис. 4, где  $p^* = p'|_{\phi} / q_0$ ;  $u^* = u|_{\phi} / \langle u \rangle$ ;  $\sigma_u^* = \sigma|_{u|_{\phi}} / u|_{\phi}$ ;  $c_f^* = \tau_w|_{\phi} / q_0$ ;  $c_f^{**} = \tau_w|_{\phi} / (q_0|_{\phi})$  и  $\sigma_{\tau}^* = \sigma_{\tau}|_{\phi} / (\tau_w|_{\phi})$ ;  $p'|_{\phi}$ ;  $u|_{\phi}$  и  $\tau_w|_{\phi}$  — условно осредненные значения пульсационной составляющей давления, скорости потока и продольной компоненты вектора поверхностного трения соответственно;  $\sigma|_{u|_{\phi}}$  и  $\sigma_{\tau}|_{\phi}$  — среднеквадратичные пульсации условно осредненных величин скорости потока и продольной компоненты вектора поверхностного трения, соответственно;  $\langle u \rangle$  — среднее значение скорости потока на оси трубы;  $q_0 = \rho \langle u_0 \rangle^2 / 2$ ;  $q_0|_{\phi} = \rho (\langle u_0 \rangle|_{\phi})^2 / 2$ ;  $\langle u_0 \rangle|_{\phi}$  — условно осредненное значение скорости потока на оси трубы.

Установлено, что величина фазового сдвига для пульсаций скорости и продольной компоненты вектора поверхностного трения достигает 0,2, а для пульсаций давления — 0,5 периода наложенных пульсаций расхода при уровне коэффициента взаимной корреляции 0,95...0,98. Следовательно, изменение параметров течения в различных сечениях рабочего участка установки под действием наложенных пульсаций расхода определено происходит неодновременно.

Величина и знак фазового сдвига между параметрами течения может меняться в зависимости от частоты наложенных пульсаций расхода и положения сечения, в котором проводились измерения. Это свидетельствует о сложной пространственно-временной структуре течения, на которую оказывают влияние как резонансные явления, так и перенос пульсаций параметров в направлении среднего движения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Под действием наложенной нестационарности на внешней границе турбулентного пограничного слоя параметры на стенке  $\tau_x$  и  $q_w$  в среднем отслеживают пульсации скорости в ядре потока с фазовым сдвигом, зависящим от частоты наложенных пульсаций, при сохранении жесткой корреляционной связи между пульсациями  $\tau_x$  и  $q_w$  при практическом отсутствии фазового сдвига.

Выявлено наличие резонансных явлений при турбулентном течении в трубе. Установлена неомонотонная зависимость гидравлического сопротивления трубы от частоты наложенных пульсаций расхода. На некоторых резонансных частотах обнаружено существование кратковременных возвратных токов вблизи стенки трубы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 05-02-16263) и ведущей научной школы (НШ-8574.2006.8).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **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.
2. **Григорьев М.М., Кузьмин В.В., Фафурин А.В.** Классификация пульсирующих турбулентных течений // *ИФЖ*. 1990. Т.59. №5. С.725—735
3. **Букреев В.И., Шахин В.М.** Экспериментальное исследование турбулентного неустановившегося течения в круглой трубе // *Аэромеханика*. М.: Наука, 1976. С. 180—187.
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. **Парих П.Г., Рейнольде В.К., Джаяраман Р.** Характеристики нестационарного турбулентного пограничного слоя // *Аэрокосмическая техника*. 1983. N 1:1. С.73—80.
6. **Дрейцер Г.А., Краев В.М.** Турбулентное течение газа при гидродинамической нестационарности. Красноярск: САА, 2001. 148 с.
7. **Дрейцер Г.А., Краев В.М.** Исследование частотных спектров пульсаций при течении в трубе в нестационарных условиях // *Тезисы докл. V Минского междунар. форума по тепло- и массообмену*, 24—28 мая 2004 г. Минск: ИТМО, 2004. С.69—70.
8. **Ковальцов Н.Н.** Структура течения и особенности турбулентного обмена в пограничном слое динамически нестационарного потока в каналах // *Изв. РАН. Энергетика*. 1995. №2. С.107—117.
9. **Mizushima T., Maruyama T., Siozaki Y.** Pulsating turbulent flow in a tube // *J. Chem. Engrs. Jap.* 1973. V.6. №6. P. 487—494.
10. **Park J.S., Taylor M.F., McEligot D.M.** Heat transfer to pulsating turbulent gas flow // *Proc. 7<sup>th</sup> Intern. Heat Transfer Conf.* 1982. Vol.3. P.105—110.
11. **Liao N.S., Wang C.C.** On the convective heat transfer in pulsating turbulent pipe flow // *1<sup>st</sup> World Conf. — Exp. Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*. 1988. P. 536—542.
12. **Genin L.G., Koval A.P., Manchka S.P., Sviridov V.G.** Hydrodynamics and heat transfer with pulsating fluid flow in tube // *Thermal Engin.* 1992. Vol.39. №5. P.251—255.
13. **Dec J.E., Keller J.O.** Pulse combustor tail-pipe heat-transfer dependence on frequency, amplitude and mean flow rate // *Combustion and Flame*. 1989. № 77. P.359—374.
14. **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.
15. **Козлов А.П., Михеев Н.И., Молочников В.М., Сайкин А.К.** Термоанемометрические измерения поверхностного трения в отрывных течениях. Казань: АБАК, 1998. 134 с.
16. **Михеев Н.И., Давлетшин И.А.** Метод измерения осредненных значений коэффициента теплоотдачи в сложных течениях // *Изв. РАН. Энергетика*. 2005. №6. С.16—19.