

**Материалы конференции «АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ
ТЕПЛОФИЗИКИ И ФИЗИЧЕСКОЙ ГИДРОГАЗО-
ДИНАМИКИ» (Новосибирск, 13–16 июня 2012 г.)**

УДК 532.517.6

**PIV-метод для исследования структуры
пульсирующего течения в гладком канале***

А.Е. Гольцман, И.А. Давлетшин, А.А. Паерелий

Исследовательский центр проблем энергетики КазНЦ РАН, Казань

E-mail: an116ya@mail.ru

Разработана система для PIV-измерений в потоке с наложенными пульсациями расхода рабочей среды — воздуха. Проведены измерения полей скорости и завихренности в гладком канале в определенных фазах наложенных пульсаций. Получены статистические характеристики турбулентного пульсирующего течения: профили скорости, турбулентных пульсаций, рейнولدсовых напряжений.

Ключевые слова: PIV-измерения, пульсирующее течение, наложенные пульсации, профиль скорости, кинематическая структура, амплитуда пульсаций скорости, осциллограмма значений скорости.

Введение

Наличие наложенных пульсаций расхода (скорости, давления) потока может заметным образом изменить кинематическую структуру течения. Например, существенно деформировать профиль скорости [1] или влиять на турбулентные характеристики [2]. В общем случае все это может привести к изменению интегральных параметров течения — гидравлического сопротивления [3] и теплоотдачи [4]. При этом на практике нельзя не учитывать сопутствующие явления: вибрации, шум. Необходимо отметить, что причинно-следственная связь возможна как в одну, так и в другую стороны: вибрации и шум сами вызывают колебания потока. Пульсации потока могут возникнуть и в режиме автоколебаний, когда те или иные локальные колебания в канале не затухают, а распространяются и поддерживаются самим потоком во всем тракте.

При исследованиях турбулентных течений с наложенными пульсациями параметры течения принято представлять как сумму трех компонент, например: $U = \langle U \rangle + U_{\text{п}} + U'$, $P = \langle P \rangle + P_{\text{п}} + P'$, где $\langle P \rangle$, $\langle U \rangle$ — средние по времени значения давления и скорости, $P_{\text{п}}$, $U_{\text{п}}$ — пульсационные составляющие давления и скорости, обусловленные наложенными колебаниями, P' , U' — турбулентные пульсационные составляющие давления и скорости. Сложность анализа таких течений заключается еще и в том, что все рассматриваемые компоненты не являются независимыми: например, в автоколебательных процессах $U_{\text{п}}$ будет зависеть от $\langle U \rangle$, а в общем случае U' будет определяться $\langle U \rangle$ и $U_{\text{п}}$.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 13-08-00359, № 13-08-00504) и Министерства образования и науки РФ (соглашение № 1752, 8078, 8714).

В свою очередь, пульсационные и турбулентные компоненты параметров могут вызвать изменения их средних значений. Между тем, выявление указанных закономерностей все еще остается актуальным: в литературе на сегодняшний день встречаются прямо противоположные суждения о характере влияния пульсаций на параметры потока [2].

Исследование сложной кинематической структуры турбулентных пульсирующих течений связано с получением большого объема информации по параметрам потока как по пространству, так и по времени. Одним из средств измерений, позволяющих решать подобного рода задачи, являются оптические PIV-системы (Particle Image Velocimetry). Метод позволяет получать за одно измерение поля скорости, завихренности, пульсаций скорости потока, сдвиговых напряжений в интересующей области. Однако существующие PIV-системы в большинстве своем имеют небольшое быстродействие — до нескольких измерений в секунду. При исследованиях пульсирующих потоков, особенно с высокой частотой, для выявления динамических характеристик процессов требуются высокоскоростные средства измерений. Одним из способов исследования динамики протекающих процессов может быть анализ и обобщение информации по отдельным фазам наложенных пульсаций — получение своего рода покадровой картины течения.

В настоящей работе исследуется структура пульсирующих течений с помощью метода PIV в различных фазах наложенных пульсаций расхода воздуха. На основе проведенных измерений построены и проанализированы поля средней скорости потока, моменты второго порядка U' , V' и $U'V'$ в течение периода наложенных пульсаций, где U и V — продольная и поперечная компоненты скорости.

Постановка эксперимента

Для исследований кинематической структуры пульсирующих потоков с помощью PIV-измерений была специально разработана экспериментальная установка, схема которой представлена на рис. 1. Рабочий участок 2 установки представлял собой канал квадратного сечения $50 \times 50 \text{ мм}^2$ длиной 1,2 м. Расположение канала вертикальное — входное сечение сверху. С целью обеспечения подсветки и съемки стенки канала изготовлены из прозрачных материалов (стекло и оргстекло). На входе в канал осуществлялся равномерный по сечению подвод аэрозоля 1. Расход воздуха и его пульсации задавались устройством 4 (пульсатором), периодически перекрывающим проходное сечение канала и установленным в выходном сечении. Управление частотой оборотов двигателя пульсатора, вал которого соединен с вращающейся заслонкой, позволило проводить эксперименты в диапазоне частот наложенных пульсаций от 0 до 190 Гц. Таким образом, при помощи пульсатора задавались среднерасходное значение скорости потока, частота и амплитуда ее пульсационной составляющей. Стабильность значений среднего расхода потока обеспечивалась ресивером 5 объемом $\sim 2 \text{ м}^3$, установленным за рабочим участком. Контроль расхода рабочей среды осуществлялся ультразвуковым расходомером ИРВИС-РС4-Ультра, установленным за ресивером.

Измерения полей скорости проводились PIV-системой «ПОЛИС» (разработка Института теплофизики СО РАН). В этой системе реализован метод цифровой трассерной визуализации [5]. В качестве трассеров использовались частицы водного раствора

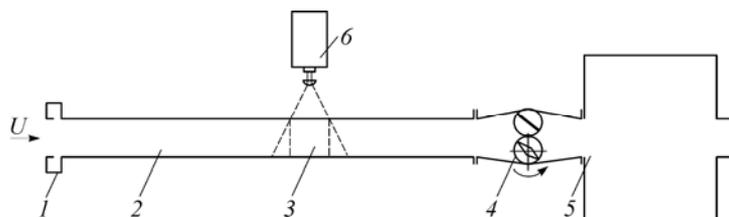


Рис. 1. Экспериментальная установка.

глицерина со средним размером порядка 0,1–5 мкм, которые вносились в поток при помощи генератора аэрозоля Safex. Подсветка в измерительной области создавалась двойным импульсным Nd:YAG лазером 6 (рис. 1) с энергией в импульсе 50...75 мДж и длительностью импульса 5 нс. Толщина лазерного ножа — 1 мм. Регистрация картины течения выполнялась цифровой 4-х Мпикс камерой, входящий в комплект системы «ПОЛИС». Камера была оснащена светосильным объективом Navitar 1''F/0.95 с фокусным расстоянием 25 мм и ручным управлением фокусировкой.

Позиционирование камеры и лазерного излучателя относительно исследуемой области 3 обеспечивалось координатным устройством. Для предотвращения засветки области измерений посторонними источниками света во время выполнения эксперимента установка закрывалась плотным светозащитным чехлом.

Для осуществления измерений в определенных фазах наложенных пульсаций был разработан блок синхронизации, который по сигналу от вращающейся заслонки пульсатора вырабатывал команду на измерение с определенной регулируемой задержкой по времени. Проведение большого количества измерений в одной и той же фазе позволяло получать статистические характеристики течения в данной фазе наложенных пульсаций.

При обработке результатов PIV-измерений применялась итерационная процедура с непрерывным смещением областей с интерполяцией изображения. Суть процедуры состоит в многократной обработке одной и той же области с использованием результатов предыдущей итерации в качестве оценки для параметров обработки на следующей итерации. Компенсация смещения частиц позволяет построить поправку к текущему приближению векторного поля. Рассматривались расчетные области размером 32×32 пикселя с 50-ти процентным перекрытием ячеек. При этом конечный размер расчетной ячейки, приходящийся на один вектор скорости, составлял 1,57 мм. Определение полей средней скорости потока и реинольдсовых напряжений проводилось на основе статистической обработки данных 500 измерений мгновенных полей скорости потока.

Погрешность определения значений мгновенного векторного поля скорости, соответствующая выбранным условиям проведения и оптической схеме эксперимента, а также алгоритму обработки полученных изображений частиц, не превышала 5 %.

Результаты исследований

На начальном этапе исследований были проведены тестовые эксперименты для трех стационарных режимов со среднерасходной скоростью потока воздуха: 5,4, 11,4, 22,5 м/с. Соответствующие числа Рейнольдса — $1,8 \times 10^5$, 4×10^5 , $7,5 \times 10^5$. Измерения проводились на участке размером 50×100 мм², находящемся на расстоянии 1 м от входа и проходящем через продольную ось канала. Результатом измерений являлись двумерные поля параметров. Полученные данные по уровню турбулентности на оси канала ($U'/\langle U \rangle \approx 0,05$, $V'/\langle U \rangle \approx 0,03$) и в пристеночной области ($U'/\langle U \rangle \approx 0,15$, $V'/\langle U \rangle \approx 0,05$ — на расстоянии $y \approx 3$ мм от стенки) показали хорошее согласование с классическими представлениями [6] о турбулентных течениях в канале.

Исследования пульсирующих течений проводились при среднерасходной скорости воздуха 5,2 м/с в диапазоне частот наложенных пульсаций $f = 20$ –180 Гц. Амплитуда пульсаций скорости определялась степенью перекрытия проходного сечения канала заслонкой пульсатора: в проведенных экспериментах — от полностью закрытого положения до полностью открытого. Измерения проводились с шагом по фазе $0,1T$, т. е. были рассмотрены 10 различных значений фазы за период T наложенных пульсаций. В экспериментах измерительный участок также находился на расстоянии 1 м от входа.

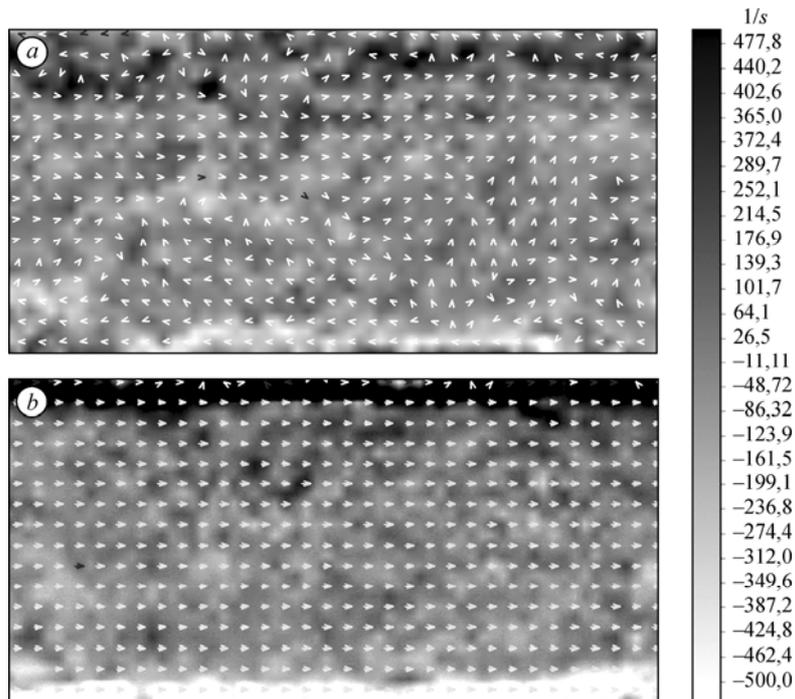


Рис. 2. Поля скорости и завихренности на пульсирующем режиме при $f = 180$ Гц для фаз: $a — 0,05T$, $b — 0,65T$.

Первичные данные PIV-измерений в виде мгновенных полей скорости для некоторых характерных режимов представлены на рис. 2. Там же показаны поля завихренности, полученные на основе полей скорости. Скорости представлены в векторной форме, завихренность — в тоновой. Палитра значений завихренности показана справа. Поля завихренности наглядным образом показывают зоны нарастания пограничных слоев. Неоднородность этих полей, очевидно, связана с наличием вихревых структур.

На основе измеренных значений скорости построены различные зависимости параметров потока. Показателем периодичности протекающих процессов является зависимость скорости потока от времени в течение периода наложенных пульсаций. На рис. 3 представлены такие зависимости значений скорости на оси канала для трех режимов по частоте наложенных пульсаций. Для сравнения на рис. 3, d приведена осциллограмма значений скорости на режиме $f = 180$ Гц, полученная термоанемометрическими измерениями на входе в канал. Здесь необходимо отметить, что термоанемометрические измерения проводились однопиточным датчиком и его показания представляли собой модуль скорости без учета направления. Как видно из графиков, PIV-измерения адекватно отражают периодический характер изменения скорости потока. При этом осреднение значений скорости по 500 измерениям сглаживает вид этих зависимостей по сравнению с осциллограммой.

В экспериментах были достигнуты относительные значения амплитуд наложенных пульсаций скорости в диапазоне $\beta = A_U / \langle U \rangle = 0,2-1,2$ (рис. 3), где A_U — амплитуда пульсаций скорости. Отметим, что указанные величины относятся непосредственно к исследуемому участку. В условиях волновой структуры течения и наличия стоячих волн в канале локальные значения амплитуд зависят не только от степени перекрытия проходного сечения, но и от продольной координаты измерительного участка. При этом режим течения с частотой наложенных пульсаций $f = 180$ Гц имел максимальные значения

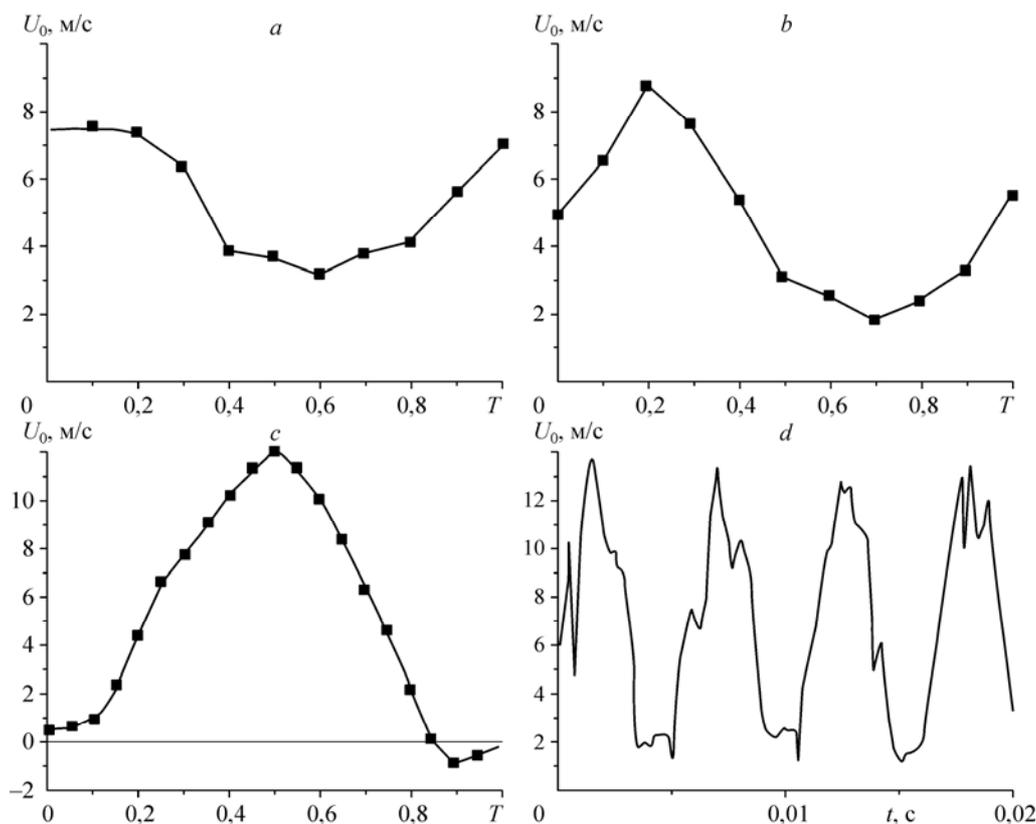


Рис. 3. Скорость потока на оси канала при $f = 20$ (a), 51 (b), 180 (c) Гц; измерения термоанемометром при $f = 180$ (d) Гц.

амплитуд скорости $\beta = 1,2$, так как оказался наиболее близким к резонансному режиму, а максимальные значения измерительного участка находилось вблизи пучности колебаний скорости. Поэтому здесь количество измерений (с шагом $0,05 T$) было в два раза больше, и результаты по этому режиму представлены более подробно.

Более полная картина кинематической структуры пульсирующего течения и ее динамики может быть получена по профилям скорости (рис. 4). Как видно из графиков, распределения скорости хорошо согласуются с представлениями о турбулентных течениях. Профили скорости становятся более полными, и степень их заполненности возрастает с увеличением числа Re и частоты наложенных пульсаций. Последнее обстоятельство, по-видимому, можно трактовать как увеличение турбулентности потока, которое и способствует большей заполненности профиля скорости. Некоторое несовпадение профилей скорости при значениях фазового угла $\varphi = 0^\circ$ и 360° (0 и T), по-видимому, связано с погрешностью измерений и, в частности, с синхронизацией сигнала на измерения в определенной фазе.

Обращает на себя внимание одинаковый вид профилей во всех фазах, правда, за исключением небольших участков, относящихся к тонким пристеночным слоям (рис. 4). В настоящей работе вблизи стенки методом PIV не удалось получить достоверные значения скорости потока. По условию прилипания скорость на стенке, очевидно, должна быть равна нулю. Таким образом, совокупность профилей скорости (за исключением пристеночного слоя) в различных фазах периода наложенных пульсаций представляют как бы один и тот же по форме профиль, находящийся на различных уровнях скорости.

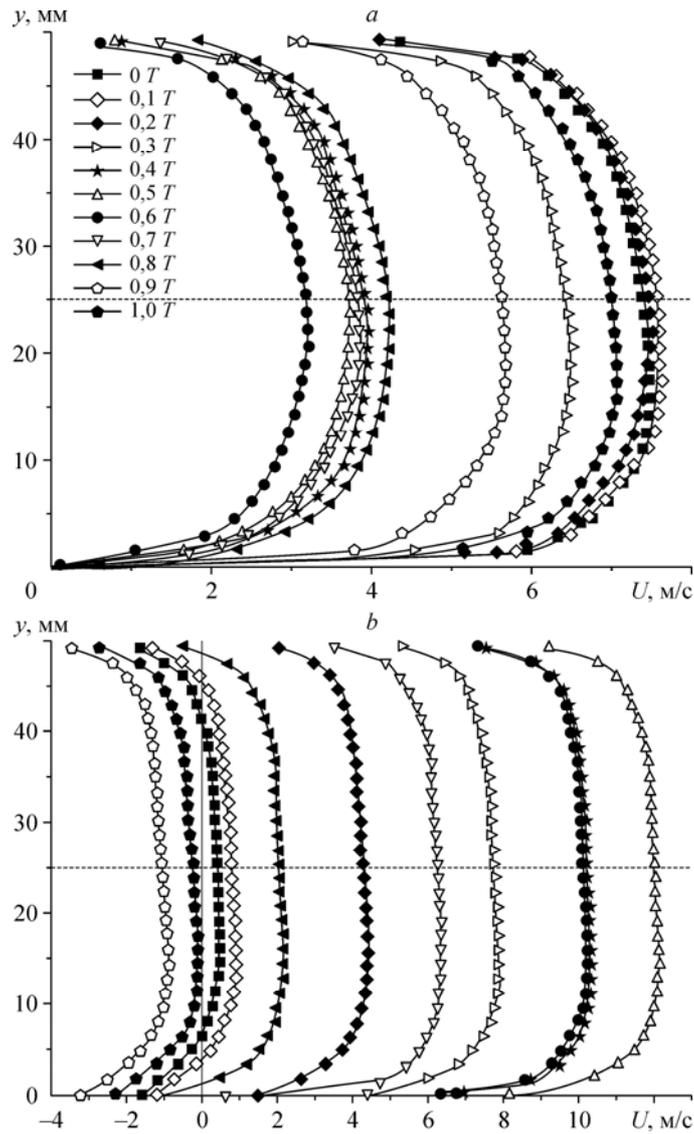


Рис. 4. Профили скорости на режимах $f=20$ (a), 180 (b) Гц.

При этом форма профиля не меняется даже при смене направления потока (рис. 4, b). Данный факт, по-видимому, можно трактовать следующим образом. Влияние стенки (напряжений трения на стенке) на скорость потока можно считать локализованным в узкой пристеночной области на расстоянии 2–3 мм от нее. В ядре же потока каждая струйка рабочей среды перемещается под действием одного и того же перепада давления в силу того, что в прямолинейном канале давление во всех точках сечения имеет одинаковые значения. Отсюда ускорения всех струек будут иметь одну и ту же величину и, соответственно, их скорости за определенный промежуток времени будут изменяться одинаково. Именно это и показывают результаты проведенных измерений (рис. 4). Отметим, что приведенные рассуждения относятся к турбулентным режимам течения, в которых инерционные силы много больше сил вязкости. В противном случае движения струек будут определяться как перепадом давления, так и силами касательных напряжений.

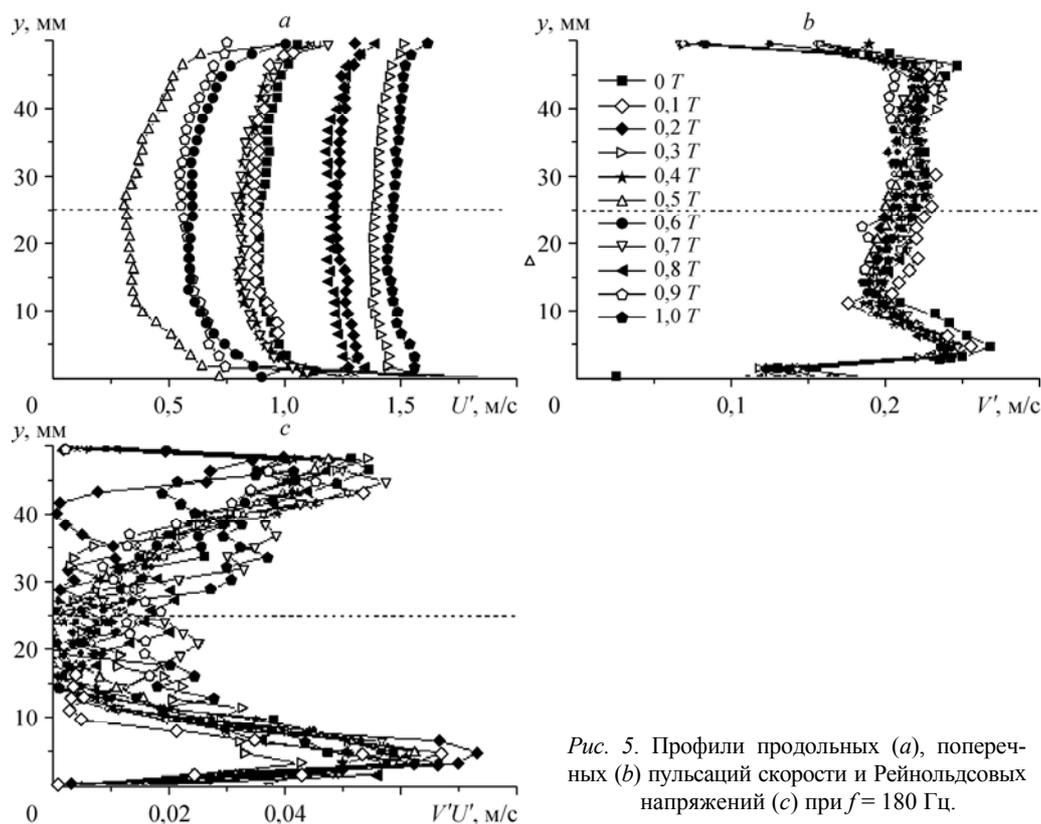


Рис. 5. Профили продольных (а), поперечных (b) пульсаций скорости и Рейнольдсовых напряжений (с) при $f = 180$ Гц.

Важнейшими параметрами потока являются его турбулентные характеристики: продольные U' , поперечные V' пульсации скорости и реинольдсовы напряжения $U'V'$. Характерные профили указанных моментов 2-го порядка для режима течения с наложенными пульсациями с частотой $f = 180$ Гц представлены на рис. 5. Параметры приведены в абсолютных величинах, так как вблизи нулевых значений скорости (в определенных фазах) применение относительных величин турбулентных параметров становится неоправданным. Экспериментальные данные по поперечным пульсациям скорости (рис. 5, b) и реинольдсовым напряжениям (рис. 5, c) не показали заметной зависимости от фаз наложенных пульсаций. Зависимость от наложенных колебаний значительным образом проявилась в пульсациях продольной компоненты скорости (рис. 5, a) — профили U' расслоились по фазам колебаний. При этом максимальные уровни турбулентности соответствуют фазам нарастания и убывания скорости потока (рис. 6 и 3), минимальные — фазам минимума и максимума скорости.

Заключение

Разработана система для PIV-измерений в потоке с наложенными пульсациями расхода. Система позволяет исследовать динамику процессов в пульсирующих потоках по отдельным фазам наложенных пульсаций. Проведены измерения полей скорости воздуха в гладком канале, получены профили скорости, установлена автомодельность их формы в течение периода наложенных пульсаций. Определены характеристики турбулентности потока: зависимость поперечных пульсаций и реинольдсовых напряжений от наложенных колебаний оказалась в пределах погрешности измерений. Продольные

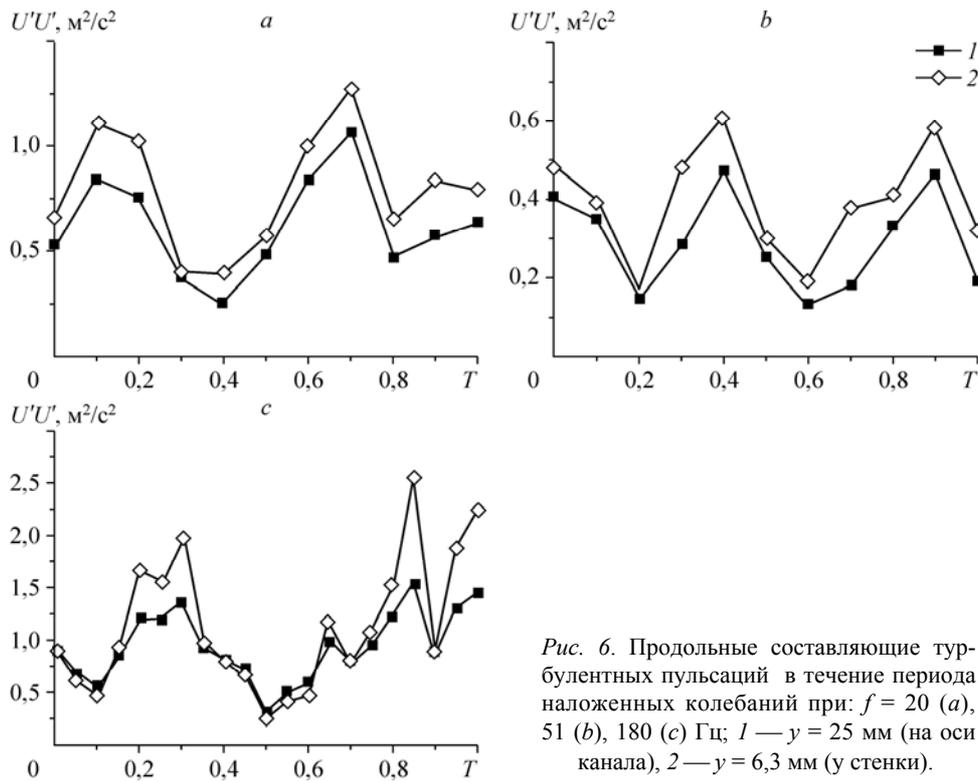


Рис. 6. Продольные составляющие турбулентных пульсаций в течение периода наложенных колебаний при: $f = 20$ (а), 51 (б), 180 (с) Гц; 1 — $y = 25$ мм (на оси канала), 2 — $y = 6,3$ мм (у стенки).

турбулентные пульсации показали заметную чувствительность к наложенным колебаниям: в фазах нарастания и убывания скорости наблюдалась максимальная турбулентность, в фазах минимума и максимума скорости — минимальная.

Список литературы

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М: Наука, 1987. 840 с.
2. Gündoğdu M.Y., Carpinlioğlu M.Ö. Present state of art on pulsatile flow theory // Jap. Soc. Mech. Eng. B. 1999. Vol. 42, No. 3. P. 384–410.
3. Давлетшин И.А., Михеев Н.И., Молочников В.М., Романов Д.И. Сопротивление круглой трубы при пульсационном изменении расхода // Изв. РАН. МЖГ. 2006. № 3. С. 96–101.
4. Давлетшин И.А., Михеев Н.И., Молочников В.М. Теплообмен в турбулентной отрывной области при наложенных пульсациях потока // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 15, № 2. С. 229–236.
5. Ахматбеков Е.К., Бильский А.В., Маркович Д.М., Маслов А.А., Поливанов П.А., Цырюльников И.С., Ярославцев М.И. Применение лазерного измерительного комплекса «ПОЛИС» для измерения полей скоростей в сверхзвуковом потоке в аэродинамических трубах // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 16, № 3. С. 343–352.
6. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. 712 с.

Статья поступила в редакцию 28 августа 2012 г.,
после доработки – 12 октября 2012 г.