

На правах рукописи



ГОЛЬЦМАН Анна Евгеньевна

**ДИНАМИКА ПРОФИЛЕЙ СКОРОСТЕЙ И КАСАТЕЛЬНЫХ
НАПРЯЖЕНИЙ В ПУЛЬСИРУЮЩЕМ ПОТОКЕ**

01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань 2015

Работа выполнена в Исследовательском центре проблем энергетики КазНЦ РАН в лаборатории гидродинамики и теплообмена и в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева» (КНИТУ-КАИ) на кафедре Реактивных двигателей и энергетических установок.

Научный руководитель: доктор технических наук
Давлетшин Ирек Абдуллович

Официальные оппоненты: **Ларионов Виктор Михайлович**,
доктор технических наук, доцент,
ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский)
федеральный университет», Институт физики,
кафедра технической физики и энергетики,
профессор;

Харчук Сергей Иванович,
кандидат физико-математических наук,
доцент, ФГБОУ ВПО «Казанский
государственный энергетический
университет», кафедра теоретических основ
теплотехники, заведующий;

Ведущая организация: ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
РАСХОДОМЕТРИИ (ФГУП ВНИИР), г. Казань

Защита состоится «30» сентября 2015 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д.212.079.02 при ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева» по адресу: 420111, г. Казань, ул. К.Маркса, 10.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева» и на сайте КНИТУ-КАИ (www.kai.ru).

Автореферат разослан «_____» _____ 2015г.

Ученый секретарь диссертационного совета
к.т.н., доцент



А.Г. Каримова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Различным техническим установкам свойственно возникновение в их трактах пульсирующих потоков. Пульсации могут создаваться механическими вибрациями конструкций или возникать на переходных режимах работы устройств. В реальных объектах причиной колебания потоков жидкости или газа также может стать гидродинамическая неустойчивость процессов. Следует учитывать, что под влиянием акустических характеристик тракта могут реализовываться резонансные режимы, характеризующиеся резким нарастанием амплитуды пульсаций. В некоторых случаях пульсации являются нежелательным явлением, в других – носят благоприятный характер и используются для интенсификации процессов переноса.

Имеющиеся результаты экспериментальных и теоретических исследований зачастую являются решениями конкретных задач и не позволяют делать широких обобщений о степени влияния наложенных пульсаций потока на характеристики турбулентного течения. В настоящее время крайне мало достоверных сведений о кинематической структуре пульсирующего потока и гидравлическом сопротивлении канала в условиях наложенной нестационарности. Основываясь на достоверной информации о структуре пульсирующего потока в канале, возможна оценка влияния наложенных пульсаций на интегральные параметры течения – гидравлическое сопротивление и теплоотдачу, выявление закономерностей изменения характеристик потока в рассматриваемых условиях.

Таким образом, получение информации о структуре пульсирующего турбулентного потока и выявление закономерностей гидродинамических процессов в таких течениях является на сегодняшний день актуальной задачей.

Цель работы – выявление закономерностей динамики профилей скоростей и касательных напряжений в потоках газа в гладком канале с наложенными пульсациями расхода.

Для достижения сформулированной цели решались следующие **задачи**:

- оценка влияния частоты и амплитуды наложенных пульсаций потока на характер распределения статического давления в канале;
- выявление основных особенностей кинематической структуры пульсирующего потока в канале на основе измерений оптическими методами;
- разработка метода определения дополнительных касательных напряжений в потоке, связанных с наложенной нестационарностью, получение профилей этих напряжений и их анализ.

Научная новизна:

- На основе экспериментальных исследований выявлено, что в зависимости от частоты и, особенно, амплитуды наложенных пульсаций потока распределения осредненного статического давления по длине канала в отличие от стационарных распределений становятся заметно нелинейными в соответствии с волновой структурой течения.

- По результатам исследований оптическими методами (PIV, SIV) установлено существенное различие форм профилей скоростей на низкочастотных и высокочастотных режимах в различных фазах наложенных пульсаций потока. Про-

фили на низкочастотных режимах показали некоторое различие форм в фазах нарастания и убывания скорости потока, на высокочастотных – оказались примерно одинаковыми по форме во всех фазах.

- Предложен метод определения дополнительных касательных напряжений в потоке, связанных с наложенной нестационарностью. Метод основан на определении напряжений по динамике профилей скоростей потока. Экспериментальными исследованиями установлено, что на низкочастотных режимах формы профилей ускорений потока и дополнительных касательных напряжений имеют заметные различия в фазах высоких скоростей и фазах низких скоростей. На высокочастотных режимах различие форм профилей наблюдается в фазах ускорения и торможения потока.

- Предложена физическая модель формирования структуры пульсирующего течения, основанная на рассмотрении совокупного воздействия нормальных (переменного градиента давления) и касательных (вязких) напряжений на распределение скоростей в потоке. Особенности структуры пульсирующего течения в рамках данной модели предлагается рассматривать в зависимости от соотношения этих напряжений: на низкочастотных режимах преобладает влияние вязких напряжений, на высокочастотных – градиента давления.

Достоверность результатов обеспечивается: использованием аттестованных средств измерения физических параметров и апробированных методик; соответствием экспериментальных данных, полученных с помощью различных методов исследования; удовлетворительным согласием с известными результатами других авторов; расчетом погрешности основных измеряемых величин.

Практическая ценность. Данные по особенностям распределения давления в канале при наложенных пульсациях скорости позволяют разрабатывать методы расчетов гидравлических потерь, а также могут быть использованы при проектировании и эксплуатации систем трубопроводов, для задач гидродинамики и теплообмена в научных исследованиях. Информация о структуре пульсирующего потока и методика оценки дополнительных касательных напряжений турбулентного течения в условиях наложенной нестационарности существенно расширяет базу данных для верификации различных методов моделирования такого рода течений, а также для оптимизации уже существующих моделей турбулентности, которые входят в коммерческие пакеты.

Основные результаты работы вошли в отчеты по контрактам с Минобрнауки (№16.518.11.7015), грантам РФФИ (10-08-00428; 10-08-00426; 12-01-16018), контракту в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (соглашение №14.132.21.1752).

На защиту выносятся:

1. Результаты экспериментального исследования гидродинамических характеристик пульсирующего турбулентного течения в канале: влияние наложенных пульсаций на распределение давления.

2. Данные исследований структуры пульсирующих течений в канале: экспериментальные данные по динамике мгновенных пространственных полей скоро-

сти потока, полученные с помощью оптических методов PIV и SIV. Особенности влияния наложенной нестационарности на распределения скорости и ускорения потока, толщину вытеснения и толщину потери импульса пограничного слоя.

3. Метод оценки дополнительных касательных напряжений турбулентного потока при наложенных пульсациях скорости в рамках двумерной плоской задачи. Закономерности распределения дополнительных касательных напряжений в пульсирующем потоке, полученные предложенным методом.

4. Физическая модель формирования структуры пульсирующего течения в канале.

Личный вклад автора. Автором самостоятельно проведены экспериментальные исследования. Выполнена обработка полученных данных, их анализ и обобщение. Все выносимые на защиту результаты диссертации получены лично соискателем.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на итоговых научно-технических конференциях КазНЦ РАН (2010 – 2013), Российской национальной конференции по теплообмену РНКТ5 (2010), Всероссийских школах-семинарах молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН В.Е.Алемасова (2010, 2012.), Школах-семинарах молодых ученых и специалистов под рук. акад. РАН А.И. Леонтьева (2011, 2013), Международных школах-семинарах «Модели и методы аэродинамики» (Евпатория, 2010-2012), Международной конференции по методам аэрофизических исследований ISMAR (Казань, 2012), Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» (Казань, 2012), Международной школе-конференции молодых ученых «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (Новосибирск, 2012), Международной молодежной конференции «XXI Туполевские чтения (школа молодых ученых)» (Казань, 2013г), Российской национальной конференции по теплообмену РНКТ6 (2014).

Публикации. Автор имеет 25 научных трудов, из них 5 статей – в журналах, рекомендованных ВАК РФ. Основные результаты диссертации опубликованы в 16 работах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 179 стр., в том числе 90 рисунков, расположенных по тексту. Список литературы включает 168 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель, задачи исследования. Приведены основные положения, которые выносятся на защиту. Показан личный вклад соискателя в полученные в диссертации результаты.

В *первой главе* представлен современный взгляд на имеющиеся в литературе данные по структуре и характеристиках нестационарных, в том числе пульсирующих, течений. Рассмотрены проблемы прогнозирования параметров турбулентных пульсирующих течений, а также влияния нестационарных граничных

условий на структуру потока, его характеристики. Отмечено, что имеющаяся экспериментальная информация по таким течениям не позволяет получать широкие обобщения в этой области, и довольно часто является противоречивой. Теоретический и расчетный анализ весьма сложен, требует мощного компьютерного оснащения. На данный момент, хоть и имеются данные по пульсирующим течениям, но в ограниченном диапазоне параметров потока. Применение допущений и упрощений в рамках различных моделей зачастую ведет к неадекватному отражению реальных процессов. В связи с этим обозначены задачи настоящего исследования.

Во *второй главе* дано описание экспериментальных установок и их основных характеристик, представлены данные о рабочих участках и средствах измерения. Представлено описание методов исследования, приводятся сведения о погрешностях методов и средств измерений.

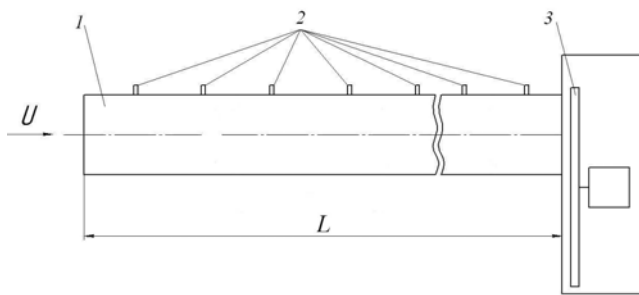


Рис. 1. Экспериментальная установка для исследований распределения давления при малых амплитудах пульсаций потока

Измерения распределения давления проводились на экспериментальной установке, рабочий участок *1* которой представлял собой гладкую стальную трубу с внутренним диаметром $D=40$ мм и длиной $L=6$ м (рис. 1). Канал имел 15 штуцеров *2* для отбора статического давления, равномерно расположенных с шагом $0,4$ м по длине трубы, начиная с $0,2$ м от входа.

Поток рабочей среды, воздуха, создавался турбокомпрессором, работающим на всасывание. Стабильное среднее значение расхода воздуха в установке обеспечивалось набором критических сопел, пульсации давления перед которыми гасились с помощью ресивера объемом $0,3$ м³. Вращение заслонки *3* квадратной формы с периодическим перекрыванием выходного сечения канала задавало пульсации расхода воздуха в установке по закону близкому к гармоническому. Управление частотой вращения электропривода заслонки позволяло варьировать частоту наложенных пульсаций в широком диапазоне значений $f = (4 - 380)$ Гц.

Отбор осредненного по времени статического давления осуществлялся с использованием капиллярной трубки длиной 200 мм и диаметром $0,8$ мм. Измерения избыточного давления (относительно атмосферного) проводились измерителями ПРОМА-ИДМ с параллельной записью данных на персональный компьютер. Мгновенные значения скорости потока на оси канала на расстоянии $5,6$ м от входа измерялись термоанемометрическим датчиком.

Эксперименты проводились при трех значениях среднего расхода воздуха в канале: $Q=25,76$; $53,2$ и $104,56$ м³/ч. При этом соответствующие среднерасходные скорости потока в канале и числа Рейнольдса составляли $U=5,7$; $11,8$; $23,1$ м/с; $Re=DU/\nu=1,5 \times 10^4$; $3,1 \times 10^4$; $6,2 \times 10^4$. Исследовались стационарные режимы и режимы в диапазоне частот наложенных пульсаций расхода $(4 - 380)$ Гц с шагом 2 Гц и при относительной амплитуде пульсаций скорости $\beta=A_U/U=0 \div 0,3$.

Для измерений распределения давления была разработана еще одна экспе-

риментальная установка, которая позволяла достигать более высоких уровней относительных амплитуд пульсаций скорости – $\beta=0\div 0,8$ (рис.2). Рабочий участок 1 установки представлял собой цилиндрическую трубу с внутренним диаметром $D=40$ мм и длиной $L=6$ м. В качестве рабочей среды в установке использовался воздух, который поступал в рабочий участок из атмосферы. Подача воздуха обеспечивалась вентилятором, который поддерживал в ресивере 5 практически постоянное разрежение.

Регулирование среднего расхода, частоты и амплитуды наложенных пульсаций скорости потока осуществлялось при помощи статической 4 и вращающейся заслонки 3 в пульсаторе 2. Вращение заслонки с периодическим перекрыванием выходного сечения канала 1 задавало пульсации расхода воздуха в установке по закону близкому к гармоническому. Имелась возможность независимого изменения ширины окон (по нормали к плоскости изображения), что обеспечивало изменение средней и динамической составляющей площади проходного сечения пульсатора. Управление скоростью вращения электропривода заслонки 3 позволяло варьировать частоту наложенных пульсаций в широком диапазоне значений – до 190 Гц.

Средний расход воздуха через рабочий участок измерялся с относительной погрешностью не более 1% ультразвуковым расходомером ИРВИС РС4-Ультра 8, установленным за ресивером 5 объемом $1,3$ м³, сглаживавшим пульсации расхода и давления перед расходомером. В двух сечениях (0 и 5,6 м от входа) на оси канала проводились измерения значений скорости потока термоанемометрическими датчиками 6 и 7. Опрос данных с этих датчиков производился с частотой 5000 Гц в течение 2 с.

Для исследований кинематической структуры пульсирующих потоков с помощью оптических методов – PIV и SIV была специально разработана экспериментальная установка, схема которой представлена на рис. 3.

Рабочий участок 2 установки представлял собой канал квадратного сечения 50×50 мм² длиной $L=1,2$ м. С целью обеспечения подсветки и видеосъемки картины течения стенки канала изготовлены из прозрачных материалов (стекло и оргстекло). На входе в канал осуществлялся подвод аэрозоля 1, равномерный по сечению. Система обеспечения подачи воздуха (пульсатор 4, ресивер 5, вентилятор, расходомер 7) здесь была использована та же, которая описана в составе предыдущей установки (рис. 2).

Расположение видеокамеры и лазерного излучателя 6 относительно исследу-

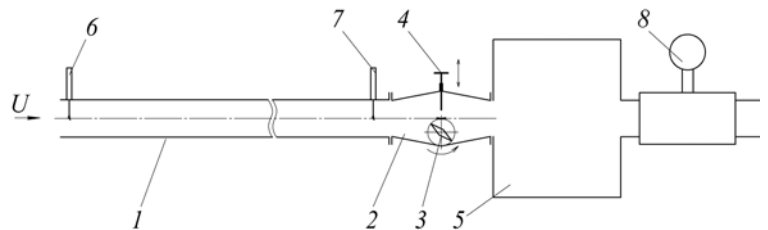


Рис.2. Установка для исследований при больших амплитудах пульсаций потока

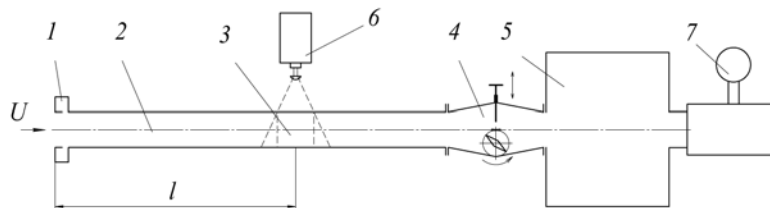


Рис. 3. Экспериментальная установка для оптических измерений

дуемой области 3 обеспечивалось координатным устройством. Исследуемая область представляла собой участок плоскости, проходящей через ось канала и находящейся на расстоянии $l=1$ м от входа. Для предотвращения засветки области измерений посторонними источниками света во время выполнения эксперимента установка закрывалась плотным светозащитным чехлом.

Глава содержит подробное описание методов PIV и SIV, методики обработки данных и расчета статистических характеристик течения, метрологического обеспечения экспериментов, а также результатов тестовых экспериментов на стационарных режимах.

В *третьей главе* приведены результаты экспериментальных исследований распределения осредненных значений статического давления в канале на пульсирующих режимах течения воздуха. Сделан анализ полученных данных, в том числе, с привлечением результатов численного расчета.

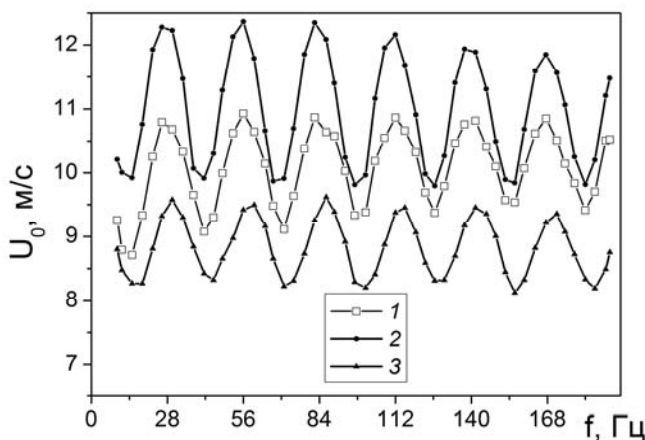


Рис. 4. Средняя по времени скорость потока: 1 – на входе в канал, 2 – в сечении 5,6 м от входа, 3 – средняя по сечению скорость по данным расходомера

напора в $(1 + \beta^2/2)$ раз. Отсюда, например, при $\beta=0,45$ (в опытах на резонансных режимах) расход потока должен уменьшиться на 10% при одном и том же ΔP . В экспериментах на этих режимах наблюдалось уменьшение среднерасходной скорости потока до 20%. Расхождение в 10% между полученной оценкой и экспериментальными данными, по-видимому, связано с отличием коэффициентов гидравлического сопротивления (трение, потери на входе и в пульсаторе) от стационарных значений. Иными словами, даже при квазистационарном рассмотрении течения (без учета изменений коэффициентов гидравлического сопротивления), потери давления в канале при пульсациях потока при одинаковом среднем расходе должны возрастать пропорционально $(1 + \beta^2/2)$.

Таким образом, экспериментальные данные по значениям расхода (осредненной скорости) пульсирующего потока воздуха при постоянном перепаде давления в канале показали заметную зависимость расхода от относительной амплитуды пульсаций скорости в канале, а именно уменьшение расхода через канал с ростом амплитуды пульсаций.

В результатах экспериментов обращает на себя внимание тот факт, что средний расход воздуха (осредненная по времени скорость) в установке, представленной на рис. 2, оказался периодической функцией от частоты наложенных пульсаций (рис. 4). Очевидно, эта периодичность связана с чередованием резонансных и нерезонансных режимов колебаний потока, которая в трубе длиной 6 м имеет шаг 28 Гц.

Данный факт согласуется со следующим положением: гармонические пульсации потока приводят к росту осредненного по времени скоростного

Полученные данные по величинам давления в измерительных сечениях позволили построить распределения статического давления по длине канала при различных частотах и умеренных амплитудах наложенных пульсаций (рис. 5). Распределения осредненного статического давления по длине канала на всех режимах оказались в коридоре шириной 5% от значений стационарного режима.

На рисунках представлены по 190 графиков, соответствующих различным частотам наложенных пульсаций расхода воздуха: стационарный режим ($f=0$ Гц) и режимы с шагом 2 Гц в диапазоне частот $f=4 \div 380$ Гц.

На графиках распределения давления видно, что с ростом амплитуды наложенных пульсаций их влияние на величины давления увеличивается: при степени перекрытия заслонкой проходного сечения $A=100\%$ ширина массива графиков (точек) несколько больше соответствующей ширины режимов с малой амплитудой. Для сравнения на графиках малых амплитуд пульсаций (степень перекрытия 70%) приведено расчетное распределение давления для стационарного режима – прямая линия.

В данном случае можно было бы ожидать прироста потерь до $(1 + \beta^2/2) = (1 + 0,3^2/2) = 1,045$ раз, т.е. на 4,5%. Как видно, эта величина находится в пределах разброса экспериментальных данных.

Распределения статического давления при более высоких значениях относительной амплитуды $\beta=0 \div 0,8$, полученные на другой экспериментальной установке (рис.2), носят несколько иной характер.

В силу периодического характера зависимости скорости потока от частоты и, соответственно, такой же зависимости скоростного напора и в графиках статического давления в разных сечениях наблюдается периодичность (рис.6). При нормировке по скоростному напору зависимости несколько сглаживаются, но не полностью, особенно в сечениях вблизи пульсатора.

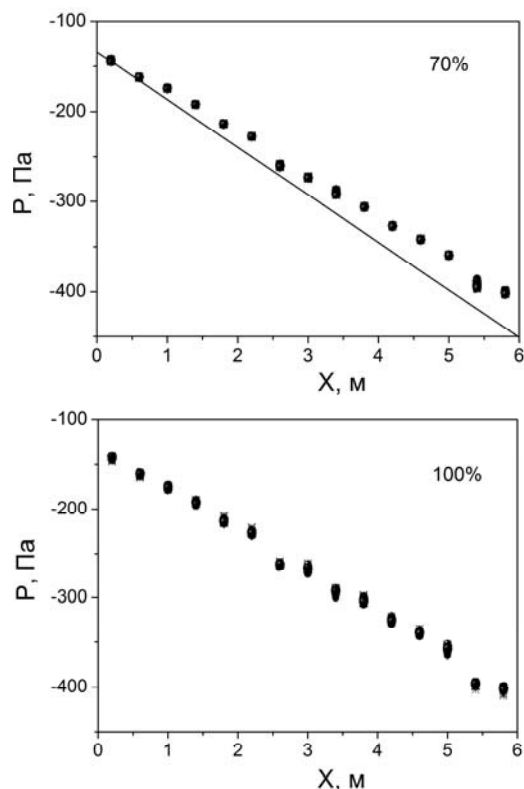


Рис.5. Распределение статического давления по длине канала при $Q=53,2$ м³/ч

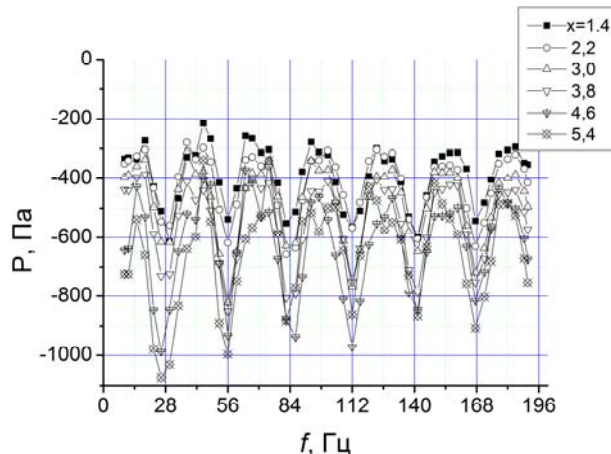


Рис. 6. Распределения статического давления на различных расстояниях от входа при $Q=(48 \div 54)$ м³/ч

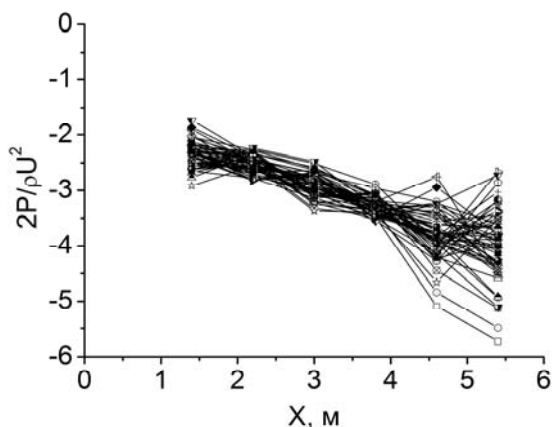


Рис. 7. Статическое давление по длине канала при $Q=(48\div 54) \text{ м}^3/\text{ч}$

Характерные распределения давления по длине представлены на рис.7 – 53 графика, соответствующих различным частотам наложенных пульсаций расхода воздуха: стационарный режим ($f=0$ Гц) и пульсирующие режимы с шагом 3-4 Гц в диапазоне частот $f=9\div 190$ Гц. Из графика видно, распределения статического давления по длине канала демонстрируют значительный разброс и немонотонный характер в зависимости от параметров нестационарности потока. Такой вид зависи-

мости свидетельствует о значительных перераспределениях по длине канала между потенциальной (давление) и кинетической (скоростной напор) составляющими энергии пульсирующего потока, который характеризуется волновой структурой. В этих условиях, очевидно, перепад давления не может являться однозначной характеристикой гидравлических потерь в канале – в противном случае нарастание давления вниз по потоку пришлось бы трактовать как отрицательные потери.

Для исследованных режимов при максимальных амплитудах колебаний скорости квазистационарная оценка дает прирост потерь на 12,5%. Однако, основываясь только на информации о перепадах или распределениях давления, эту оценку невозможно ни подтвердить, ни опровергнуть. В этом случае оценку гидравлического сопротивления канала, очевидно, необходимо производить на основе изменений полного импульса потока.

Таким образом, экспериментальными исследованиями установлено, что оценка гидравлического сопротивления гладких каналов на пульсирующих режимах течения рабочей среды при умеренных амплитудах скорости потока ($\beta < 0,3$) может быть проведена в квазистационарном приближении по перепадам осредненного давления. При больших значениях амплитуд ($\beta \geq 0,3$) данных только по значениям давления будет недостаточно – потребуется дополнительная информация о распределениях скоростного напора потока. Эта информация может быть получена по результатам исследований кинематической структуры пульсирующих течений и ее динамики.

Четвертая глава посвящена изучению кинематической структуры пульсирующего потока, анализу статистических характеристик течения, которые были получены с помощью оптических методов – PIV и SIV.

Разработанная система для PIV-измерений позволила исследовать динамику процессов в пульсирующих потоках по отдельным фазам наложенных пульсаций. По результатам PIV-измерений установлено, что профили скорости становятся более полными, и степень их наполненности возрастает с увеличением числа Re и частоты наложенных пульсаций.

При этом на некоторых режимах форма профиля не меняется даже при смене направления потока (рис.8). Распределения скорости хорошо согласуются с представлениями о турбулентных течениях. Определены характеристики турбулентности потока: в течение периода наложенных пульсаций величина продольных турбулентных пульсаций скорости потока показала немонотонную зависимость по фазам колебаний, поперечная турбулентность и напряжения Рейнольдса в этом плане оказались консервативными.

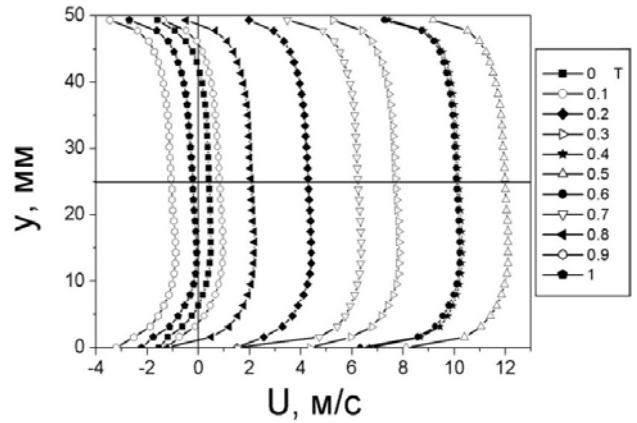


Рис. 8. Профили продольной компоненты скорости на режиме $f=180$ Гц

Отдельным этапом проводились исследования структуры пульсирующих течений с использованием дымовой визуализации в канале экспериментальной установки, представленной на рис.3. Для получения статистических характеристик потока использовался оптический метод SIV, основанный на покадровой обработке видеоизображения, полученного при помощи скоростной съемки (N.S.Dushin, N.I. Mikheev/ Method for quantitative estimation of flow parameters using smoke visualization data // Int. Conf. on the Methods of Aerophysical Research, Kazan, Russia: Abstracts. Pt. I. – Kazan, 2012. – P. 75 – 76).

Результаты обработки данных позволяли строить осциллограммы скорости в любой точке потока, поля скоростей в интересующих областях канала в любой момент времени, определять осредненные характеристики течения и т.д. Полученные зависимости значений скорости по времени отражают периодичность изменения скорости в течение периода наложенных пульсаций – скорость на оси и в различных точках по ширине канала изменялась по закону, близкому к гармоническому.

Представление об основных особенностях пульсирующего турбулентного течения удалось получить при анализе и сравнении условно-осредненных профилей скорости потока по фазам для различных расходов воздуха в канале в широком диапазоне частот наложенных пульсаций. В экспериментах работа пульсатора обеспечивала относительные амплитуды пульсаций скорости до $\beta=A_U/U_0=1,2$. Следует отметить, что амплитуда A_U и средняя скорость U_0 в представленных результатах имеют локальный характер и относятся к точке на оси измерительного сечения. В других сечениях, ввиду волновой структуры пульсирующего течения, амплитуды, очевидно, будут иметь иные значения. Так, на основе полученных методом SIV полей скорости построены профили скоростей. Два характерных режима по частоте – 6 и 130 Гц при среднем расходе $Q=48$ м³/ч ($Re=2,6 \times 10^4$) представлены на рис.9-10.

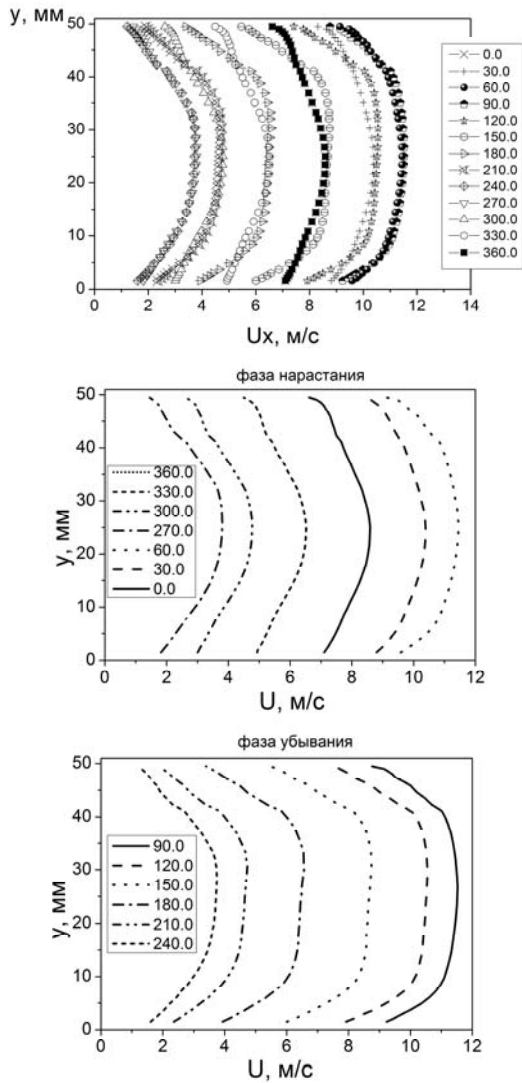


Рис. 9. Профили продольной компоненты скорости пульсирующего потока: $\beta=0,51, f=6$ Гц

Установлено, что на низкочастотных режимах (рис.9) наблюдается заметное различие форм профилей скоростей в фазах нарастания и убывания. В фазе ускорения течения профиль скорости становится более наполненным; происходит интенсивное взаимодействие между замедленным течением в пристеночной зоне и основным потоком в ядре. Другими словами, интенсифицируется периодическое обновление вязкого подслоя. При торможении потока зона вблизи стенки расширяется, профиль скорости становится менее наполненным. На высокочастотных режимах (рис.10) такого разделения не наблюдается: формы профилей во всех фазах имеют примерно одинаковый вид.

Интегральными показателями профилей скоростей являются толщины вытеснения, потери импульса и потери энергии. Эти параметры могут в той или иной

Полученные с помощью PIV и SIV профили согласуются между собой: например, на высокочастотных режимах в течение периода наложенных пульсаций форма профиля практически не меняется.

Следует отметить, что при исследованиях пульсирующих течений методом SIV имеется возможность жесткой привязки параметров потока к определенной конкретной фазе наложенных пульсаций. Эта возможность связана с тем, что обработка (анализ) данных производится в пределах одного непрерывного процесса (видеофайла). Параметры потока в различных точках увязываются с изменением скорости в определенной точке (опорной осциллограммой). Отсутствие внешних команд на установление этой связи значительно уменьшает погрешность выявления динамических характеристик потока, даже в условиях дрейфа частоты наложенных пульсаций.

Распределения скорости за период наложенных колебаний потока оказались автономными при изменении расхода воздуха Q : профили заметным образом изменяются при варьировании частотой наложенных пульсаций, но «сохраняют» свою индивидуальность при малых и больших значениях расхода (диапазон $Q=28\div 100$ м³/ч, $Re=1,1\div 5,7\times 10^4$).

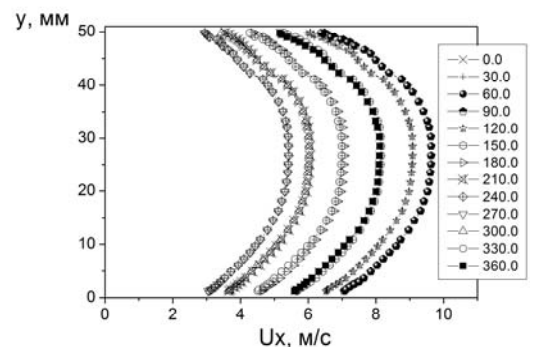


Рис. 10. Профили продольной компоненты скорости пульсирующего потока: $\beta=0,28, f=130$ Гц

мере характеризовать, в том числе, и гидравлические потери потока.

На основе полученных профилей скоростей определены зависимости толщины вытеснения δ^* (рис. 11,а) и толщины потери импульса δ^{**} (рис. 11,б) пограничного слоя в пульсирующем потоке от фазового угла наложенных пульсаций для широкого диапазона частот.

Толщина вытеснения (для канала квадратного сечения) определялась выражением:

$$\frac{\delta^*}{R} = \frac{1}{2} - \int_0^1 \frac{u}{U} \left(1 - \frac{y}{R}\right) d\left(\frac{y}{R}\right),$$

где R – половина ширины канала (половина гидравлического диаметра), y – координата стенки канала, u – текущая скорость в канале, U – скорость на оси. Для сравнения на графике (рис. 11, а) прямыми линиями обозначены толщины вытеснения для профилей «1/7» ($\delta^*=2,68$ мм) и «1/10» ($\delta^*=2,15$ мм).

В осесимметричном канале определение величины толщины потери импульса осуществлялось следующим образом:

$$\frac{\delta^{**}}{R} = \int_0^1 \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u}{U}\right) \left(1 - \frac{y}{R}\right) d\left(\frac{y}{R}\right)$$

На рис. 11, б прямыми линиями также приведены величины толщины потери импульса пограничного слоя для профилей по закону «1/7» ($\delta^{**}=1,516$ мм) и «1/10» ($\delta^{**}=1,18$ мм).

Полученные данные согласуются с известными положениями о течениях такого рода. Толщина вытеснения и толщина потери импульса пограничного слоя определяются параметрами нестационарности потока, а также положением сечения относительно волновой структуры потока в канале: их значения в среднем за период пульсаций в пучностях скорости заметно отличаются от соответствующих величин для стационарного режима.

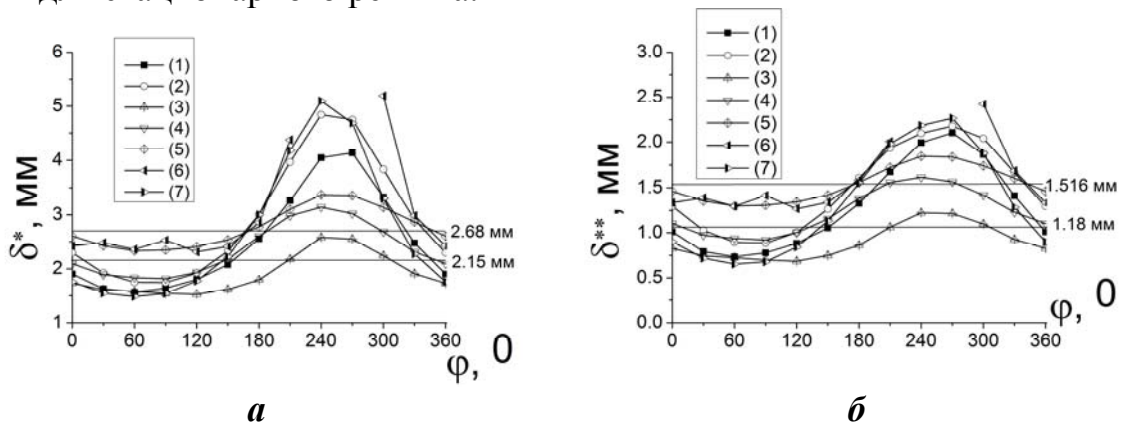


Рис. 11. Толщина вытеснения (а) и толщина потери импульса (б) в течение периода наложенных пульсаций:

1 – $Q=48$ м³/ч, $f=6$ Гц; 2 – $Q=48$ м³/ч, $f=10$ Гц; 3 – $Q=47$ м³/ч, $f=25$ Гц; 4 – $Q=47$ м³/ч, $f=70$ Гц; 5 – $Q=48$ м³/ч, $f=130$ Гц; 6 – $Q=38$ м³/ч, $f=190$ Гц; 7 – $Q=65$ м³/ч, $f=6$ Гц

Из графиков видно, что в момент нарастания скорости толщина вытеснения убывает, а в момент убывания скорости – возрастает, что еще раз подтверждает выводы, сделанные ранее: форма профиля скорости становится более наполненной при ускорении потока, при торможении – профиль менее наполненный. Такой

же вывод был получен и в работе Краева В.М. (Краев В.М. Турбулентная структура и теплогидравлические параметры нестационарных течений в каналах энергетических установок // Автореф. дисс. ... д-ра. техн. наук. М. МАИ (ГТУ). 2006. - 40 с). Аналогичные тенденции наблюдаются и для δ^{**} . На высоких частотах толщина вытеснения δ^* и толщина потери импульса δ^{**} в среднем за период колебаний оказались довольно близки к стационарным значениям. На низких частотах разбросы значений δ^* , δ^{**} по фазам более существенны, чем на высоких частотах.

В пятой главе приведены метод и результаты оценки дополнительных касательных напряжений пульсирующего потока в канале.

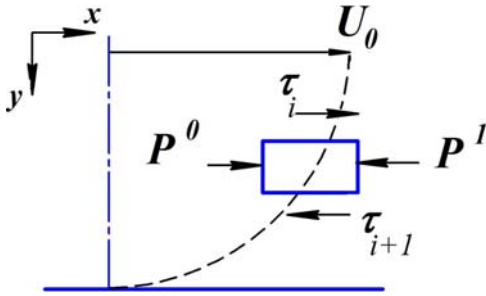


Рис. 12. Схема напряжений в потоке

Полученная в работе информация по ускорениям потока является характеристикой дополнительных напряжений, действующих в нестационарном потоке. Эти напряжения состоят из нормальных и касательных составляющих. На основе этих суммарных напряжений возможна оценка дополнительных касательных напряжений путем вычленения нормальных напряжений. Под «дополнительными» напряжениями понимается та их часть, которая оказывает влияние на профиль скоростей, его деформацию при наложенной нестационарности.

На основе этих соображений предлагается метод оценки дополнительных касательных напряжений, суть которого в рамках двумерной плоской задачи поясняется схемой на рис. 12.

Итак, уравнение движения для элемента записывается следующим образом:

$$\frac{\Delta U_i}{\Delta t} \cdot \rho \Delta x \Delta y \Delta z = (P^0 - P^1) \Delta y \Delta z - (\tau_{i+1} - \tau_i) \Delta x \Delta z,$$

где $\frac{\Delta U_i}{\Delta t}$ - ускорение, ρ - плотность, $\Delta x \Delta y \Delta z$ - объем рассматриваемого элемента, P^0 и P^1 - нормальные напряжения, действующие на элемент выше и ниже по потоку, соответственно, τ_{i+1} , τ_i - касательные напряжения.

Из условия симметрии потока касательные напряжения на оси равны нулю: $\tau_0=0$. Нормальные напряжения по всему сечению y одинаковы:

$$P^0 - P^1 = \Delta P_0 = \frac{\Delta U_0}{\Delta t} \cdot \rho \Delta x.$$

Окончательное уравнение для определения дополнительных касательных напряжений принимает вид:

$$\tau_i = \frac{\rho \Delta y}{\Delta t} \sum_{k=0}^{k=i} (\Delta U_0 - \Delta U_k),$$

где ΔU_0 , ΔU_k - приращения скорости на оси канала и в k -ой точке за промежуток времени Δt . В приведенных ниже случаях период T делился на 12 фаз - $\Delta t=T/12$.

Соответственно, для исследуемого канала квадратного сечения без учета угловых эффектов в потоке соотношение примет вид:

$$\tau_i = \frac{\rho \Delta y}{\Delta t} \sum_{k=0}^{k=i} \left[(\Delta U_0 - \Delta U_k) \cdot \left(1 + \frac{y_k}{y_{k+1}}\right) \right],$$

где y – поперечная координата, начиная от оси канала.

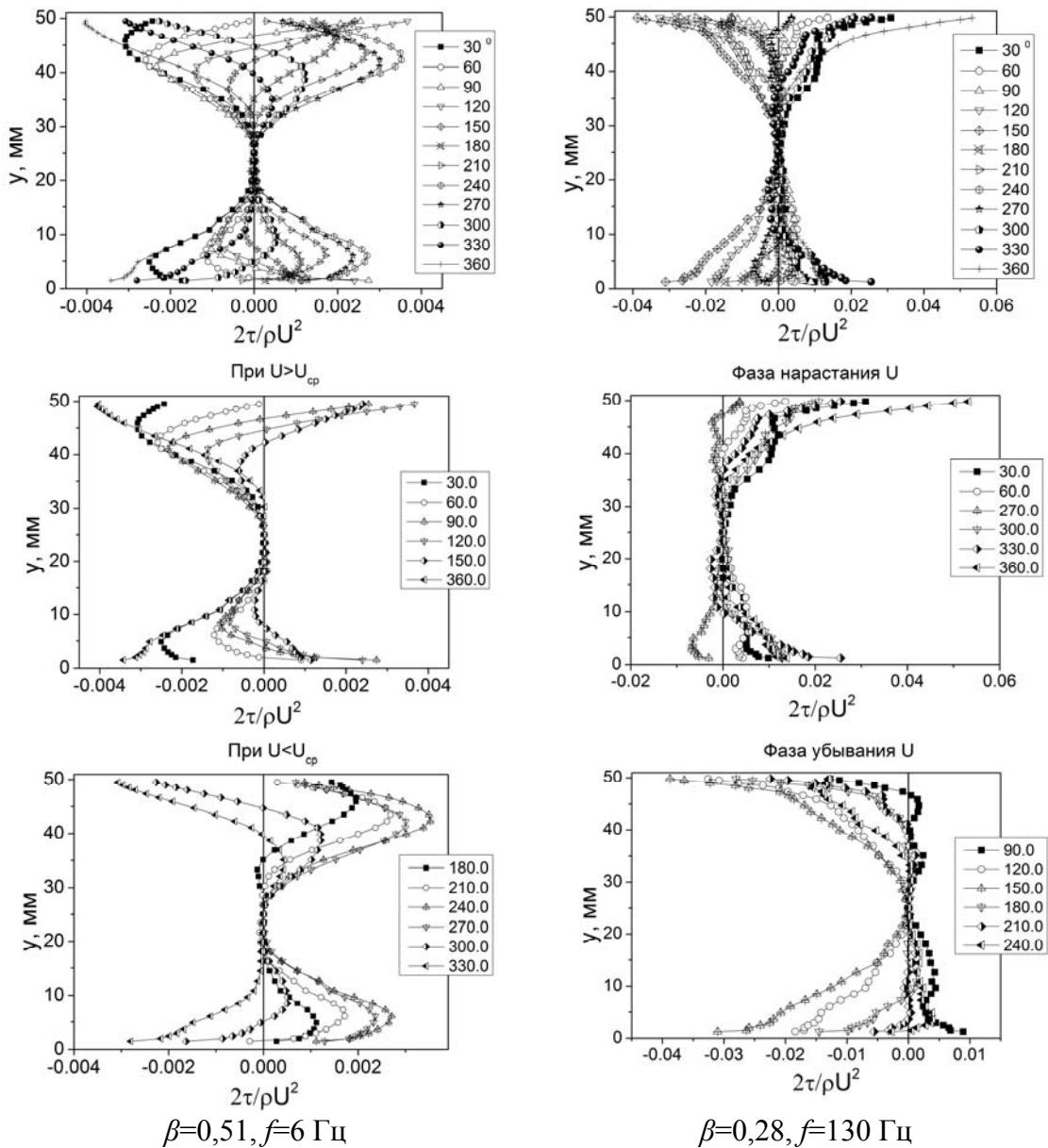


Рис. 13. Дополнительные касательные напряжения

Полученные таким образом характерные распределения дополнительных касательных напряжений по поперечному сечению канала для двух режимов по частоте – 6 и 130 Гц при среднем расходе $Q=48$ м³/ч ($Re=2,6 \times 10^4$) представлены на рис. 13. Следует отметить, что по числу Рейнольдса (среднерасходной скорости) формы профилей дополнительных касательных напряжений оказались в целом автомодельными. Касательные напряжения нормированы по величине скоростного напора, где использована средняя скорость потока на оси канала.

Так же как и для профилей скоростей на графиках распределения дополнительных касательных напряжений наблюдается различие их форм при низких ($f=6 \div 10$ Гц) и высоких частотах ($f=25 \div 190$ Гц). Для низких частот характер изме-

нения профилей является заметно более сложным и сопровождается изменениями знаков величин напряжений и их производных. Профили напряжений имеют до трех локальных экстремумов: на оси и на некоторых расстояниях от стенок.

Для высокочастотных режимов формы профилей близки к параболам. На режимах при частотах наложенных колебаний $f=25\div 190$ Гц профили дополнительных касательных напряжений хорошо группируются по фазам нарастания и убывания скорости (рис. 13).

Таким образом, по результатам экспериментов и на основе анализа большого массива полученных данных предлагается следующая физическая модель формирования структуры пульсирующего течения в канале. Пульсирующие потоки в канале по своей структуре (по меньшей мере, по профилям скоростей, ускорений и дополнительных касательных напряжений) можно условно разделить на 2 типа по режимам течения – низкочастотный и высокочастотный.

В силу того, что структура пульсирующего течения и ее динамика формируются под совокупным действием переменного градиента давления и касательных (вязких) напряжений, различные соотношения между ними приводят к появлению особенностей гидродинамических параметров потоков. В этих условиях к первой группе можно отнести течения, где вязкие напряжения играют заметную роль в формировании структуры потока. Во второй группе структура течения формируется преимущественно под действием переменных нормальных напряжений, влияние вязких напряжений существенно меньше.

В заключении сформулированы основные выводы по работе:

1. Получены экспериментальные данные по распределениям осредненных значений статического давления в канале на пульсирующих режимах течения воздуха. Установлено, что при небольших относительных амплитудах пульсаций скорости потока $\beta < 0,3$ оценка гидравлических потерь в канале может быть проведена по осредненному перепаду давления. При $\beta \geq 0,3$ распределения давления отражают волновую структуру пульсирующего течения. В этом случае для оценки гидравлических потерь необходима дополнительная информация о параметрах потока.

2. По результатам исследования структуры пульсирующего течения в канале при помощи оптических методов PIV и SIV получены профили скоростей, турбулентности, ускорений в различных фазах наложенных пульсаций потока. Установлено существенное различие форм профилей и их динамики на *низкочастотных* и *высокочастотных* режимах течения. На низкочастотных режимах формы профилей претерпевают существенные изменения в течение периода колебаний потока. При этом они сохраняют определенное сходство в отдельных промежутках времени (фазах). На высокочастотных режимах формы профилей остаются примерно одинаковыми во всех фазах наложенных пульсаций.

3. Разработан метод определения дополнительных касательных напряжений, связанных с наложенными пульсациями потока. Метод основан на информации об ускорениях потока. Впервые построены профили этих напряжений. На низкочастотных режимах профили дополнительных касательных напряжений показали немонотонный, вплоть до смены направления, характер с экстремумами на

оси канала и в пристеночных областях. На высокочастотных режимах профили дополнительных касательных напряжений имеют вид монотонных зависимостей от оси к стенкам.

4. На основе полученных экспериментальных данных предложена физическая модель пульсирующего течения в канале. Суть модели заключается в том, что структура пульсирующего течения и ее динамика формируются под совокупным действием переменного градиента давления и касательных (вязких) напряжений. Различные соотношения между этими напряжениями определяют особенности гидродинамических параметров потоков.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК для публикации основных результатов работы:

1. *Гольцман А.Е.* Гидравлическое сопротивление гладкой трубы на пульсирующих режимах течения газа / И.А. Давлетшин, Н.И. Михеев, А.Е. Гольцман // Труды Академэнерго. – 2011. – №1. – С.22 – 30.

2. *Гольцман А.Е.* Исследование структуры потока в гладком канале на пульсирующих режимах течения с помощью PIV-измерений / А.Е. Гольцман, И.А. Давлетшин, А.А. Паерелий // Труды Академэнерго. – 2012. – №1. – С.7 – 13.

3. *Гольцман А.Е.* PIV-метод для исследования структуры пульсирующего течения в гладком канале / А.Е. Гольцман, И.А. Давлетшин, А.А. Паерелий // Теплофизика и аэромеханика. – 2013. – Т.20, №3. – С.367 – 374.

4. *Гольцман А.Е.* Расход через длинный канал с вращающейся заслонкой на конце / А.Е. Гольцман, И.А. Давлетшин, С.А. Колчин, Н.И. Михеев // Изв. РАН. МЖГ. – 2014. – № 4. – С. 31 – 34.

Работы, опубликованные в других изданиях:

1. *Гольцман А.Е.* Распределение статического давления в гладкой трубе на пульсирующих режимах течения / И.А. Давлетшин, А.И. Давлетшин, Н.И. Михеев, А.Е. Гольцман // Труды Академэнерго. – 2010. – №1. – С.7 – 15.

2. *Гольцман А.Е.* Гидравлическое сопротивление дискретно шероховатых каналов на пульсирующих режимах течения / А.Е. Гольцман, А.К. Кирилин // Материалы докладов VII Школы-семинара мол. ученых и спец. акад. РАН В.Е. Алемасова «Проблемы теплообмена и гидродинамики в энергомашиностроении». Казань, 15-17 сентября 2010.– Казань, 2010. – С. 147 – 150.

3. *Гольцман А.Е.* Гидравлическое сопротивление дискретно шероховатого канала на пульсирующих режимах течения / И.А. Давлетшин, Н.И. Михеев, А.Е. Гольцман, Г.В. Стинский // Модели и методы аэродинамики: материалы X Межд. школы-семинара. Евпатория, 3-12 июня 2010.–М.: МЦНМО, 2010.– С. 58–59.

4. *Гольцман А.Е.* Теплоотдача и гидравлическое сопротивление дискретно шероховатых каналов на пульсирующих режимах течения / Н.И. Михеев, И.А. Давлетшин, А.Е. Гольцман, А.К. Кирилин // Материалы докладов V Российской нац. конф. по теплообмену РНКТ5. – М.: Изд. дом МЭИ, 2010. – Т.2. – С. 189 – 192.

5. *Гольцман А.Е.* Гидродинамические параметры пульсирующего течения в гладкой трубе / А.Е. Гольцман, И.А. Давлетшин, Н.И. Михеев // Тезисы докладов

XVIII Школы-семинара мол. уч. и спец. под рук. акад. РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в новых энергетических технологиях», 23-27 мая 2011 г., г. Звенигород. Россия. – М.: Изд. дом МЭИ, 2011. – С.47 – 48.

6. *Гольцман А.Е.* PIV-измерения структуры пульсирующих течений / И.А. Давлетшин, А.Е. Гольцман, А.А. Паерелий // Материалы XI Межд. школы-семинара «Модели и методы аэродинамики», 3-12 июня 2011 г., г. Евпатория, Украина. – М.: МЦНМО, 2011. – С.64 – 65.

7. *Гольцман А.Е.* PIV-измерения структуры потока в гладком канале на пульсирующих режимах течения / А.Е. Гольцман, Н.И. Михеев, И.А. Давлетшин, А.А. Паерелий // Материалы докладов VII Межд. молодежной науч. конф. «Тинчуринские чтения», г.Казань, 25-27 апреля 2012 г.: в 4 т. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2012.– Т.2. – С.185 – 186.

8. *Гольцман А.Е.* PIV-метод для исследования структуры пульсирующего течения в гладком канале / А.Е. Гольцман, И.А. Давлетшин, А.А. Паерелий // Материалы докладов XII Межд. школы-конференции мол. ученых «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики», г. Новосибирск, 13-16 июня 2012 г. – Новосибирск: Ин-т теплофизики СО РАН, 2012.– С.32.

9. *Гольцман А.Е.* PIV-measurements of the pulsatile flow structure in a smooth pipe / А.Е. Goltzman, I.A. Davletshin, A.A. Paereliy // Int. Conf. on the Methods of Aerophysical Research, August 19 – 25, 2012, Kazan, Russia: Abstracts. Pt. I / ed. V.M. Fomin. – Kazan, 2012. – P. 120 – 121.

10. *Гольцман А.Е.* Исследование структуры пульсирующего потока в гладком канале / А.Е. Гольцман, И.А. Давлетшин, А.А. Паерелий // Материалы докладов VIII Школы-семинара мол. ученых и спец. Акад. РАН В.Е. Алемасова «Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении». Казань, 16-18 октября 2012г. – Казань, 2012. – С. 225 – 227.

11. *Гольцман А.Е.* Оценка параметров пульсирующего потока в гладком канале по результатам дымовой визуализации / А.Е. Гольцман, И.А. Давлетшин, А.А. Паерелий // Тезисы докладов XIX Школы-семинара мол. ученых и спец. под рук. акад. А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» 20-24 мая 2013, г. Орехово-Зуево. Россия. – М.: Изд. дом МЭИ, 2013. – С. 173 – 174.

12. *Гольцман А.Е.* Кинематическая структура и профили параметров пульсирующего потока по результатам дымовой визуализации / А.Е. Гольцман, И.А. Давлетшин, А.А. Паерелий // Материалы межд. молодежной конф. «XXI Туполевские чтения (школа молодых ученых)», г. Казань, 19-21 ноября 2013 г.- – Казань: Изд-во Казан.гос.техн.ун-та, 2013. – Т.II.– С.587 – 588.

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 0,93. Тираж 120. Заказ Д34.

Полиграфический участок Издательства КНИТУ-КАИ
420111, Казань, К. Маркса, 10