

САХОВСКИЙ АЛЕКСЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОАНЕМОМЕТРА ПОСТОЯННОГО
СОПРОТИВЛЕНИЯ С ЗАГРЯЗНЕННОЙ ТЕПЛООТДАЮЩЕЙ
ПОВЕРХНОСТЬЮ**

Специальности: 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника
01.02.05 - механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань, 2010

Работа выполнена в Исследовательском центре проблем энергетики Казанского научного центра РАН и Казанском государственном техническом университете им. А.Н.Туполева

- | | |
|-----------------------|---|
| Научный руководитель | - доктор технических наук
Н.И. Михеев; |
| Официальные оппоненты | - доктор технических наук
Г.А. Глебов;

- кандидат технических наук
В.В. Леманов; |
| Ведущая организация | - Всероссийский научно-исследовательский институт расходометрии |

Защита состоится “15” декабря 2010г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д212.079.02 при Казанском государственном техническом университете им. А.Н.Туполева по адресу: 420111, г.Казань, ул. К.Маркса, 10.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке КГТУ им.А.Н. Туполева. Электронный вариант автореферата размещен на сайте Казанского государственного технического университета им. А.Н.Туполева (www.kai.ru).

Автореферат разослан 13 ноября 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

А.Г. Каримова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Методы и средства измерения мгновенных значений гидродинамических и тепловых параметров потока играют важную роль в задачах управления различными технологическими процессами, а также находят широкое применение при проведении научных исследований в теплофизике, механике жидкости и газа, химии и других областях, где необходимо контролировать параметры текучей среды. Среди наиболее доступных и универсальных следует выделить термоанемометрический метод, используемый как при проведении фундаментальных исследований, так и в промышленности.

Одним из примеров применения термоанемометрического метода в промышленности служат вихревые расходомеры газа. Принцип их действия основан на эффекте формирования дорожки Кармана в следе за неподвижным телом обтекания. Поле скоростей за телом обтекания начинает пульсировать с частотой срыва вихрей. Термоанемометрический датчик скорости преобразует эти пульсации в выходной электрический сигнал, из которого в свою очередь выделяется частота срыва вихрей, которая в широком диапазоне скоростей пропорциональная объемному расходу через преобразователь.

В реальных условиях эксплуатации термоанемометра в научных исследованиях и в технике чувствительный элемент датчика часто находится в условиях загрязненного потока, в котором присутствуют частицы пыли, ржавчины, пары различных органических соединений и другие вещества. Эксплуатация термоанемометра в оборудовании, где невозможно обеспечить чистоту среды, ведет к постепенному загрязнению нити датчика.

Известно, что загрязнение чувствительного элемента неблагоприятно влияет на погрешность измерений и частотные характеристики термоанемометра. Учитывая, что в вихревом расходомере основным информативным параметром является частота пульсационной составляющей сигнала, некоторое ослабление амплитуды, связанное с загрязнением нити, допускается и никак не влияет на погрешность измерения расхода. Однако при сильном загрязнении нити амплитуда полезного сигнала уменьшается настолько критично, что становится одного порядка с амплитудой шумов различной природы. В этом случае достоверность выделения частоты срыва вихрей ставится под сомнение и погрешность измерения расхода не гарантируется.

До настоящего времени изучалось лишь влияние присутствия в потоке частиц загрязнения на работу термоанемометрического датчика скорости, без учета толщины и теплофизических свойств слоя загрязнения нити. Вопрос допустимой степени загрязнения чувствительного элемента детектора вихрей в вихревом расходомере газа не ставился.

В связи с этим тема диссертационной работы, посвященной диагностике загрязнения термоанемометрической нити в вихревом расходомере, представляется актуальной.

Цель работы состоит в разработке надежных методов диагностирования степени загрязнения нити термоанемометра постоянного сопротивления в процессе эксплуатации и прогнозирования последствий загрязнения нити на результат измерений.

Задачи исследования:

1. Разработать математическую модель термоанемометра постоянного сопротивления с загрязненной нитью, работающего в качестве измерителя скорости потока и детектора вихрей вихревого расходомера газа.
2. Провести численное и физическое моделирование влияния фактора загрязнения на статические и динамические характеристики термоанемометра постоянного сопротивления с загрязненной термоанемометрической нитью.
3. Разработать метод диагностирования степени загрязнения термоанемометрической нити в вихревом расходомере.
4. Выработать и обосновать критерий допустимого загрязнения термоанемометрической нити в процессе эксплуатации вихревого расходомера.

Научная новизна.

1. Разработана модель термоанемометра постоянного сопротивления с загрязненной теплоотдающей поверхностью, работающего в качестве измерителя скорости потока и детектора вихрей в вихревом расходомере. Модель основана на решении двумерной задачи теплопроводности с учетом концевых утечек и зависимости тепловыделения от местной температуры нити. Адекватность модели подтверждена экспериментальными данными.
2. Оценено и обобщено влияние основных факторов загрязнения на статические и динамические характеристики работы термоанемометра с загрязненной нитью.
3. Предложен и апробирован метод диагностирования степени загрязнения термоанемометрической нити в процессе эксплуатации расходомера, основанный на связи ослабления амплитуды выходного сигнала со степенью загрязнения.
4. Предложен и обоснован критерий допустимой степени загрязнения чувствительного элемента детектора вихрей, при котором обеспечивается измерение расхода газа без дополнительной погрешности от этого фактора.

Практическая и научная значимость.

Разработанные методы позволяют оценить влияние степени загрязнения чувствительного элемента термоанемометра, работающего в качестве датчика скорости и детектора вихрей расходомера газа, на изменение градуировочной зависимости и АЧХ.

Метод прогнозирования загрязнения нити термоанемометра в процессе эксплуатации вихревого расходомера позволяет заблаговременно предупредить о предпосылках появления дополнительной погрешности измерения расхода.

Результаты работы использованы в отчетах по гранту Президента РФ для поддержки ведущих научных школ (проект НШ-4334.2008.8), грантам РФФИ (06-08-00521, 07-08-00330, 09-08-00597 и 08-08-12181 офи), ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (проекты №02.740.11.0071 и П227). Ведется внедрение метода прогнозирования загрязнения чувствительного элемента в серийные расходомеры модельного ряда ИРВИС.

Рекомендации по использованию результатов. Результаты исследований могут быть использованы при разработке вихревых расходомеров газа, а также при анализе причин дисбаланса при учете газа.

Автор защищает:

1. Математическую модель термоанемометра с загрязненным чувствительным элементом, работающего в режиме постоянного сопротивления.
2. Результаты экспериментальной оценки и моделирования статической и динамической характеристик термоанемометра постоянного сопротивления с загрязненной нитью, работающего в качестве измерителя скорости потока и детектора вихрей вихревого расходомера.
3. Метод диагностирования загрязнения термоанемометрического детектора вихрей в вихревом расходомере газа по амплитудно-частотной характеристике датчика.
4. Критерий предельно допустимого загрязнения нити термоанемометра вихревого расходомера без появления дополнительной погрешности измерений расхода от влияния этого фактора.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием аттестованной экспериментальной установки и поверенных средств измерения, удовлетворительным согласованием результатов моделирования и экспериментальных данных между собой и с известными данными других авторов, хорошей воспроизводимостью опытных данных.

Личный вклад автора. Соискатель отработал технику искусственного загрязнения термоанемометрической нити, подготовил экспериментальную установку и провел все эксперименты, разработал метод моделирования термоанемометра постоянного сопротивления с загрязненной нитью. Анализ полученных результатов исследований выполнен под руководством д.т.н. Н.И.Михеева.

Апробация работы. Основные положения работы доложены на следующих конференциях и научно-технических семинарах: Итоговые научные конференции за 2008 и 2009 гг. Казанского научного центра Российской академии наук, Казань; Ежегодные научные аспирантские семинары Исследовательского центра проблем энергетики КазНЦ РАН, Казань, 2008-2010; VI и VII Школа-семинар молодых ученых и специалистов акад. В.Е.Алемасова «Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в

энергомашиностроении», Казань, 2008, 2010 гг.; VIII, IX, X Международная школа-семинар «Модели и методы аэродинамики», Евпатория, 2008-2010 гг.; X Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики», Новосибирск, 2008; XXI Всероссийская межвузовская научно-технической конференции «Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках», Казань, 2009; XVII Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в аэрокосмических технологиях» Жуковский, 2009; Научно-практическая конференция и выставка "Инновации РАН-2010", Казань, 2010, Пятая российская национальная конференция по теплообмену, Москва, 2010.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 работ, в том числе – 2 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК.

Структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, списка литературы. Работа изложена на 109 страницах машинописного текста, содержит 59 рисунков, 7 таблиц. Список литературы включает 110 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, научная новизна и практическая ценность полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации выполнен анализ предметной области. На основе работ (L.V. King, H. Kramers, R. Hilpert, H.H. Bruun, D.C. Collis, M.J. Williams, S. Corrsin, P. Bradshaw, J.O. Hinze, D. Freymuth, A.E. Perry, L.S.G. Kovaszny, A.A. Жукаускас, В.Е. Алемасов, А.П. Козлов, Г.А. Глебов, Н.И. Михеев, Л.П.Ярин, Б.П. Устименко и др.) дано описание термоанемометрического метода. Выполнен сравнительный анализ термоанемометров постоянного напряжения, тока и сопротивления (температуры), показаны перспективы развития основных схем. Рассмотрены основные составляющие погрешности измерений.

Обзор методов математического моделирования термоанемометра базируется на работах А.И.Попова, А.Ф.Полякова, Ю.А. Кирсанова, P.Paranthoen, C. Petit, J.C. Lecordier. Отмечено, что в большинстве моделей вопросы частотной и пространственной разрешающей способностей, а также охлаждающего влияния державок нити рассматриваются по отдельности. Отмечается, что наиболее целесообразным является объединение этих факторов в одну передаточную функцию, что и выполнено в ряде работ. Общим недостатком известных работ является допущение о том, что распределение тепловыделения вдоль нити не связано с ее локальной температурой. Между тем, в термоанемометрии применяются нити с высокой чувствительности электрического сопротивления к температуре.

Рассмотрено применение термоанемометра в роли детектора вихрей промышленного вихревого расходомера. Известно, что применение термоанемометрического датчика позволяет существенно расширить динамический диапазон измерения расхода на область малых среднерасходных скоростей потока (Д.В. Кратиров, Н.И. Михеев).

Одной из проблем при эксплуатации термоанемометра как в качестве датчика скорости, так и в качестве детектора вихрей, является загрязнение его чувствительного элемента. Имеется крайне ограниченное количество публикаций, посвященных экспериментальному исследованию работы лишь термоанемометрических датчиков скорости в условиях загрязненного потока (К. Kawashima, Н. Jorgensen, R.W. Moss). Что касается вихревой расходомерии, вопрос диагностирования загрязнения чувствительного элемента в процессе эксплуатации расходомера в литературе не ставился. Производители приборов чаще всего стараются либо снизить темп загрязнения датчика конструктивными мерами, либо регламентируют периодическую очистку чувствительного элемента датчика вне зависимости от его фактического состояния.

Отмеченные обстоятельства позволили сформулировать цели и задачи настоящего исследования.

Во второй главе приведено описание и основные характеристики используемых в работе экспериментальных установок и объектов исследования, оборудования и средств измерения, а также методов исследования.

Экспериментальная установка №1 (рис.1) использовалась для оценки характеристик вихревого расходомера с загрязненным термоанемометрическим детектором вихрей. Поток атмосферного воздуха создавался с помощью турбокомпрессора. Ресивер 1 с герметичным фланцем 2 позволял сгладить пульсации давления перед критическими соплами 3, с помощью которых задавался и контролировался расход. В качестве детектора вихрей использовался цифровой термоанемометр, входящий в состав расходомера ИРВИС РС-4 4, в тело обтекания которого устанавливался исследуемый датчик (рис.2, а).

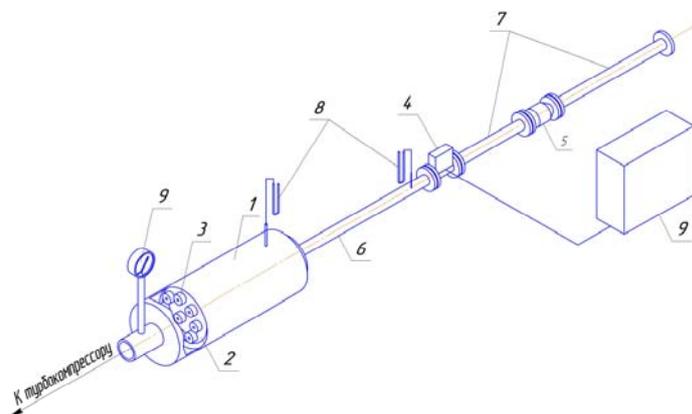


Рис.1. Схема экспериментальной установки №1: 1 – ресивер; 2 – герметичный фланец; 3 – критические сопла; 4 – вихревой расходомер ИРВИС-РС4; 5 – выравнивающее устройство; 6 – поствключенный участок; 7 – предвключенный участок; 8 – манометры; 9 – персональный компьютер.

Выравнивающее устройство 5, поствключенный 6 и предвключенный 7 участки обеспечивали корректную работу расходомера. Давление на поствключенном участке и перед соплами измерялось манометрами 8. Результаты измерения выводились на персональный компьютер 9 по интерфейсу RS-232. Для каждого значения объемного расхода фиксировалась частота срыва вихрей, среднее значение и амплитуда тока. Диаметр проходного сечения измерительной магистрали D составлял 50 и 150 мм. Толщина загрязняющего слоя δ при диаметре нити $d = 8$ мкм варьировалась от 1 до 20 мкм. Расход и соответствующие ему средние скорости в экспериментах изменялись в диапазоне $12.32 - 2853.8$ м³/ч и $0.797 - 44.859$ м/с соответственно.

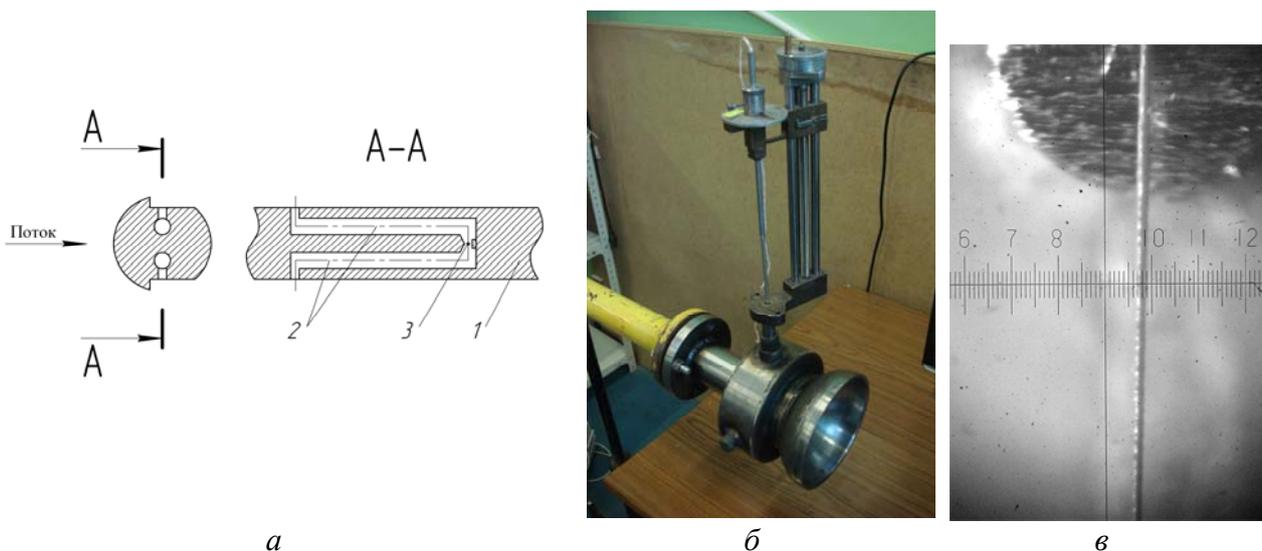


Рис.2. Объекты исследования: *a* - форма тела обтекания расходомера и схема расположения канала перетока в нем: 1- тело обтекания, 2- канал перетока, 3- нить термоанемометра; *б* – камера Эйфеля; *в* - нить, покрытая краской, 70-кратное увеличение.

Схема лабораторной установки №2, использовавшейся для исследования характеристик одноточечного термоанемометрического датчика скорости, представлена на рис. 3. Установка включала турбокомпрессор 1, ресивер 2, заслонку 3 и вихревой расходомер-счетчик газа ИРВИС-К-300 5, с помощью которых соответственно регулировался и контролировался объемный расход воздуха в тракте, поствключенный участок 4, выравнивающее устройство 6, координатное устройство 8 с термоанемометрическим зондом, установленным в рабочей части камеры Эйфеля 7 (рис.2,б) диаметром 50 мм. Последняя обеспечивала равномерность профиля скорости в измерительном участке. В экспериментах использовался цифровой термоанемометр ИРВИС ТА-5.

Первоначально фиксировались параметры выходного сигнала датчиков с чистой нитью. Затем на нить наносился слой искусственного загрязнения, и эксперимент повторялся. Характеристики сигнала в цифровом виде передавались по интерфейсу RS-232 на персональный компьютер для дальнейшей обработки.

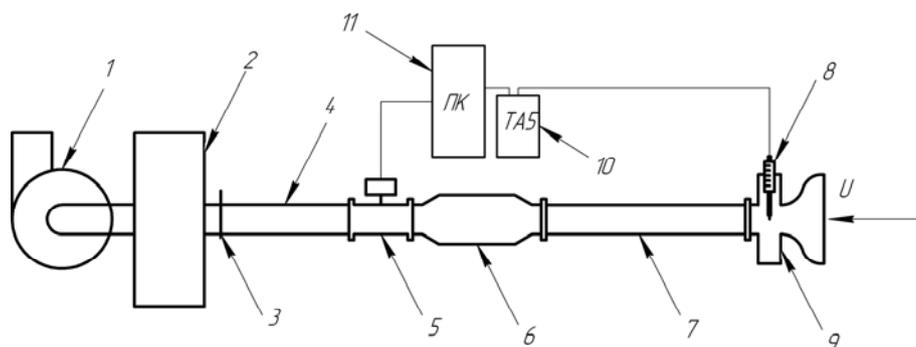


Рис.3. Схема экспериментальной установки №2: 1 – турбокомпрессор; 2 – ресивер; 3 – регулятор расхода; 4 - поствключенный участок; 5 – вихревой расходомер ИРВИС-К300; 6 – выравнивающее устройство; 7 - поствключенный участок; 8 - термоанемометрический датчик; 9 – камера Эйфеля; 10 – цифровой термоанемометр ИРВИС ТА-5; 11 – персональный компьютер.

Отработаны методы нанесения покрытия, имитирующего загрязнение. Отмечается, что из нескольких апробированных технологий наилучшее качество покрытия обеспечил метод распыления краски на нить с последующей сушкой. Слой краски не проводил электрический ток, надежно крепился на нити и не уносился потоком, обладал достаточной термостойкостью (до 200⁰С при толщине загрязнения до 12 мкм). Реализация этого варианта осуществлялась с помощью одноцилиндрового компрессора, распыляющего нитроцеллюлозную краску НЦ-25 на датчик, равномерно вращаемый в струе аэрозоля. Фотография нити с нанесенным слоем краски представлена на рис.2,в.

В третьей главе представлен метод моделирования выходного сигнала (силы тока) термоанемометра постоянного сопротивления с нитью, находящейся как непосредственно в потоке, так и в канале перетока, расположенном внутри тела обтекания расходомера.

Загрязнение нити считалось осесимметричным, а теплофизические и электрические свойства нити, загрязняющего слоя и газа - неизменными по длине. Коэффициент теплоотдачи α между текучей средой и нитью не изменяется по длине нити, но изменяется по времени. Считалось также, что загрязняющее вещество не проводит электрический ток.

В основе модели лежит уравнение теплопроводности в цилиндрической системе координат

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right), \quad (5)$$

из численного интегрирования которого определялось температурное состояние нити и слоя загрязнения. Здесь T – температура, τ – время, a – коэффициент температуропроводности, x и r – продольная и поперечная координаты.

Работа термоанемометра в режиме постоянного сопротивления описывается как

$$\frac{dI}{d\tau} = k(R_{\text{н}} - R_{\text{зад}}), \quad (6)$$

где I – ток, протекающий через нить, k – коэффициент усиления в цепи обратной связи термоанемометра, $R_{\text{зад}}$ – заданное сопротивление нити, $R_{\text{н}}$ – текущее сопротивление, определяемое как

$$R_{\text{н}} = \int_0^l \frac{4\rho_r(1 + \alpha_t(T(x) - 20))}{\pi d^2} dx, \quad (7)$$

здесь l – длина нити, ρ_r – удельное электрическое сопротивление нити, α_t – температурный коэффициент сопротивления. Закон теплообмена нити с окружающей средой описывался критериальным соотношением

$$Nu = a_1 + a_2(\text{Re})^{a_3 - a_4 \ln \text{Re}} \quad (8)$$

с коэффициентами a_1 , a_2 , a_3 и a_4 , принятыми на основе литературных данных. Для случая термоанемометрического датчика скорости изменение скорости потока U в расчетах задавалось по гармоническому закону:

$$U = U_0 + A_U \sin(2\pi f \tau + \varphi), \quad (9)$$

где U_0 – средняя скорость потока, A_u – амплитуда скорости, f – частота пульсационной составляющей скорости потока, φ – фазовый угол.

Для моделирования работы детектора вихрей в составе расходомера модель дополнена уравнениями, учитывающими связь между параметрами потока, набегающего на тело обтекания, и течения в канале перетока.

Полагалось, что перепад давления на противоположных поверхностях обтекаемого тела в области отверстий отбора в канал перетока (рис.2,а), связанный с формированием вихрей Кармана, пропорционален скоростному напору набегающего потока и изменяется по гармоническому закону

$$\Delta P = K_p \rho_{\text{г}} \frac{W^2}{2} \cdot \sin(2\pi f \tau), \quad (10)$$

где $\rho_{\text{г}}$ – плотность газа; W – среднерасходная скорость в трубопроводе, K_p – коэффициент амплитуды пульсаций давления, $K_p \approx 1$.

Частота срыва вихрей связана со скоростью внешнего потока W через число Струхала Sh и диаметр тела обтекания $D_{\text{т}}$ (множитель 2 связан с принятым определением частоты для пары вихрей):

$$f = 2Sh \frac{W}{D_{\text{т}}}. \quad (11)$$

В уравнении движения газа в канале перетока

$$\frac{dU}{d\tau} = \frac{\Delta P \cdot F_{\text{отв}} - R_{\text{сопр}}(\tau, W)}{\rho_{\text{г}}(F_{\text{кан}} L_{\text{кан}} + F_{\text{отв}} L_{\text{отв}})} \quad (12)$$

учтено гидравлическое сопротивление канала $R_{\text{сопр}}$, которое оценивалось по известным соотношениям для ламинарного режима течения. Канал перетока принимался ступенчатым (рис.2,а) с участками длиной $L_{\text{отв}}$ и $L_{\text{кан}}$ и соответствующими им площадями сечений $F_{\text{отв}}$ и $F_{\text{кан}}$.

Для нити и загрязняющего вещества использовалось два типа граничных условий на торцах: теплоизоляция (нулевой тепловой поток в продольном направлении) и постоянство температуры (температура в месте крепления к державке равна температуре окружающей среды). На продольной оси и в центральном поперечном сечении принималось условие теплоизоляции. На границе нити и слоя загрязнения задавалось граничное условие 4 рода:

$$\lambda_n \left. \frac{dt}{dy} \right|_{y=r_n} = \lambda_{гр} \left. \frac{dt}{dy} \right|_{y=r_n} \quad (13)$$

В качестве начальных условий принималось $T = T_r$.

Для численного интегрирования уравнений был выбран метод конечных элементов. Использовался переменный шаг сетки по оси абсцисс со сгущением сетки вблизи державки. Пример расчетной сетки с началом координат в центре нити показан на рис.5.

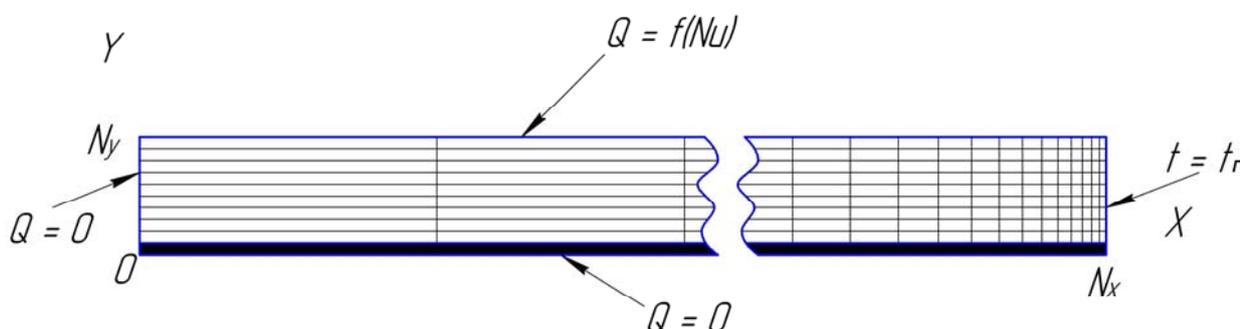


Рис.5. Пример расчетной сетки.

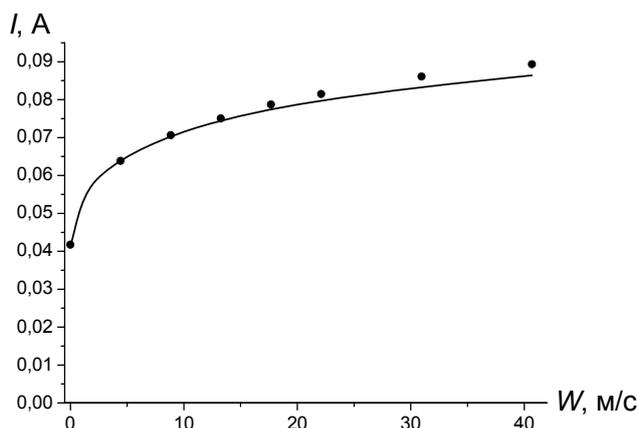


Рис.6. Градуировочная характеристика датчика скорости, линия – расчет, точки – эксперимент.

электрофизических свойств нити.

В четвертой главе представлены результаты физического и численного моделирования статической (градуировочной) и динамической (амплитудно-частотной) характеристик термоанемометрического датчика скорости с

В конце главы приведены результаты тестовых расчетов для термоанемометрического датчика скорости с чистой нитью диаметром $d = 8$ мкм и длиной $l = 2,5$ мм. Показано, что расчетные данные при различных скоростях потока хорошо согласуются с экспериментом (рис.6), что свидетельствует об адекватности математической модели. Незначительные отличия (до 3,5%) градуировочных характеристик могли быть вызваны погрешностью задания тепло- и

загрязненной нитью. Глава начинается с характеристик термоанемометра с чистой нитью как базы для оценки влияния загрязнения.

Градуировочные характеристики для датчиков с чистой нитью разной длины приведены на рис.7. Среднее значение выходного сигнала (тока) выше у коротких нитей вследствие большей доли утечек тепла (рис.8), которая и определяет смещение статической характеристики термоанемометрического датчика скорости.

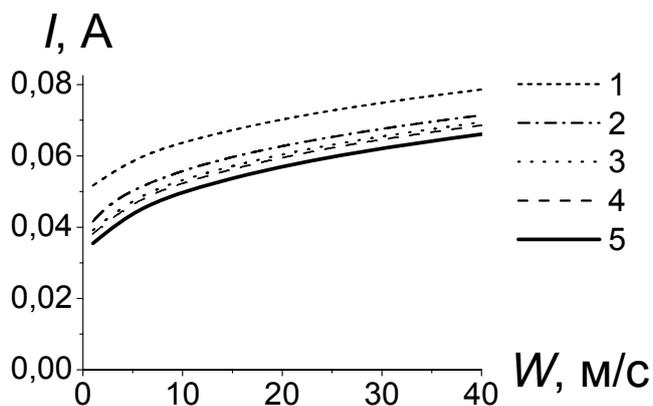


Рис.7. Влияние длины нити на статическую характеристику: 1 – $l = 1$ мм; 2 – $l = 2$ мм; 3 – $l = 3$ мм; 4 – $l = 4$ мм; 5 – нить без утечек.

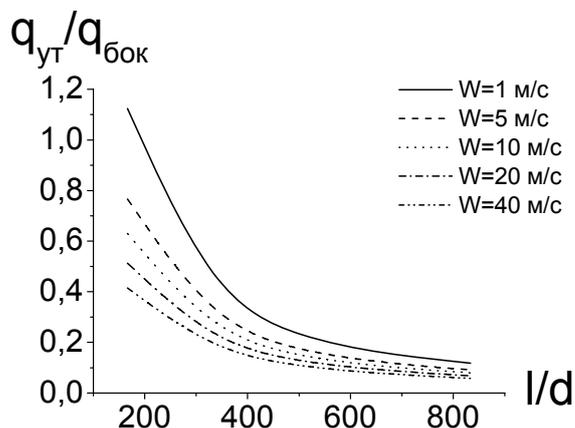
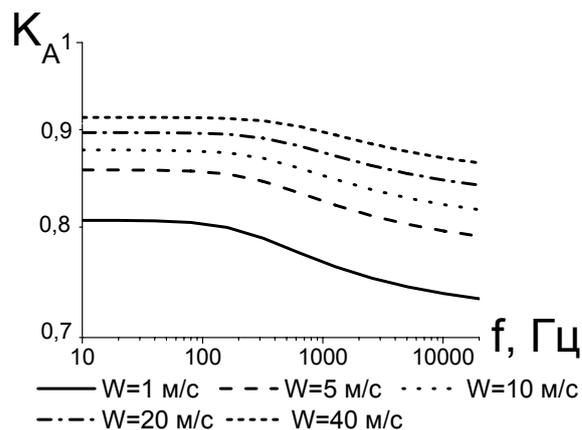
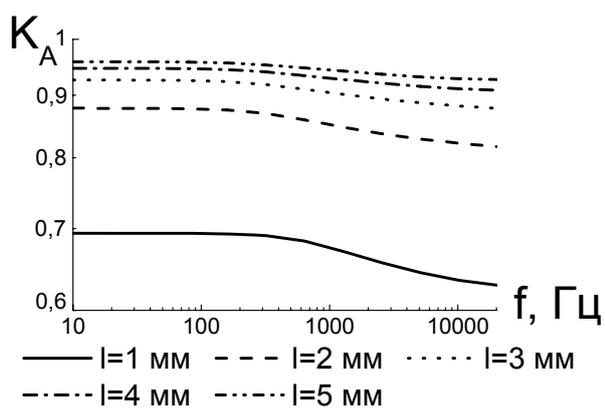


Рис.8. Влияние относительной длины нити и скорости потока на долю концевых утечек.

Показано, что для термоанемометра постоянной температуры тепловой поток с боковой поверхности не зависит от утечек через ножки датчика. Градуировочная характеристика реального термоанемометра отличается от градуировочной характеристики с бесконечно длинной нитью только наличием концевых утечек.

Под АЧХ чистой нити понималась зависимость отношения относительных амплитуд пульсаций тока для реальной нити с концевыми утечками и идеальной нити без утечек от частоты пульсаций скорости потока. Результаты моделирования АЧХ для разных скоростей потока и длин нити (рис.9) показали, что на низких частотах пульсаций скорости наблюдается ослабление относительной амплитуды пульсаций тока для коротких нитей, связанное со смещением их статических характеристик (рис.7). Ослабление амплитуды в среднем диапазоне частот связано с изменением амплитуды и фазового сдвига концевых утечек (рис.10). При высоких частотах (5 кГц и более) дальнейший рост f существенного влияния на утечки не оказывает, т.к. температурное состояние нити не успевает меняться, и в каждой точке $T \approx \text{const}$ (рис.11).



a

б

Рис.9. АЧХ чистых датчиков скорости: *a* - различные длины нитей, $d = 6 \text{ мкм}$, $W = 10 \text{ м/с}$, *б* - скорости потока, $d = 6 \text{ мкм}$, $l = 2 \text{ мм}$.

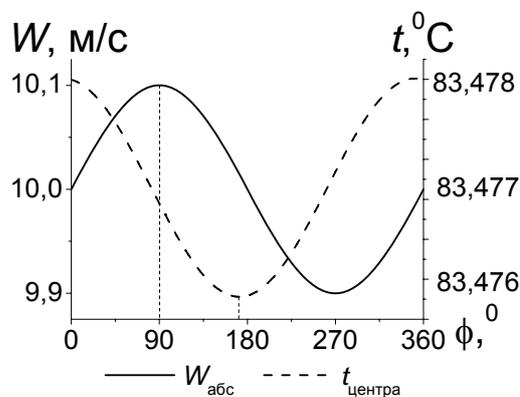
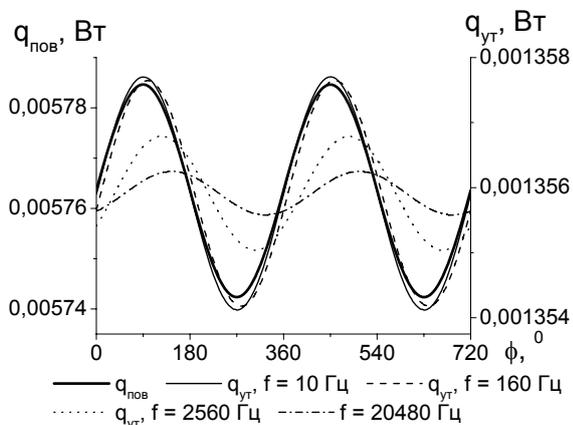


Рис.10. Влияние частоты пульсаций на концевые утечки.

Рис.11. Связь скорости потока и температуры нити при $f = 20 \text{ кГц}$.

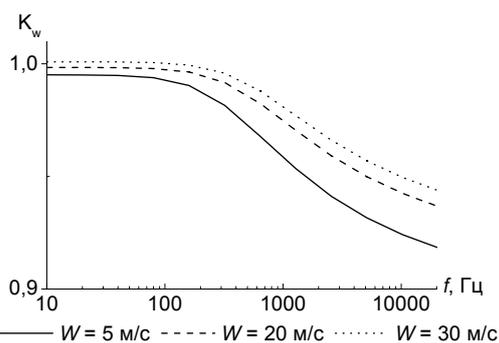


Рис.12. Зависимость коэффициента ослабления пульсаций скорости от частоты

Следует отметить, что динамическая характеристика чистой нити, рассчитанная по амплитуде пульсаций скорости, на низких частотах ослабления практически не претерпевает и близка к единице (рис.12) вследствие того, что $q_{\text{ут}}$ пропорционален $q_{\text{пов}}$ (рис.10). С ростом f появляется фазовый сдвиг, который является причиной ослабления K_w .

В случае термоанемометрического датчика скорости с загрязненной нитью на статическую характеристику влияет не только доля концевых утечек, зависящая от длины нити (рис.13,*a*), но и толщина загрязняющего слоя (рис.13,*б*). Расчет хорошо согласуется с результатами эксперимента (рис.13, *в*).

Расхождение не превышало 5 % и могло быть вызвано погрешностью закона теплообмена и измерений толщины загрязняющего слоя, отклонениями формы нити от цилиндрической.

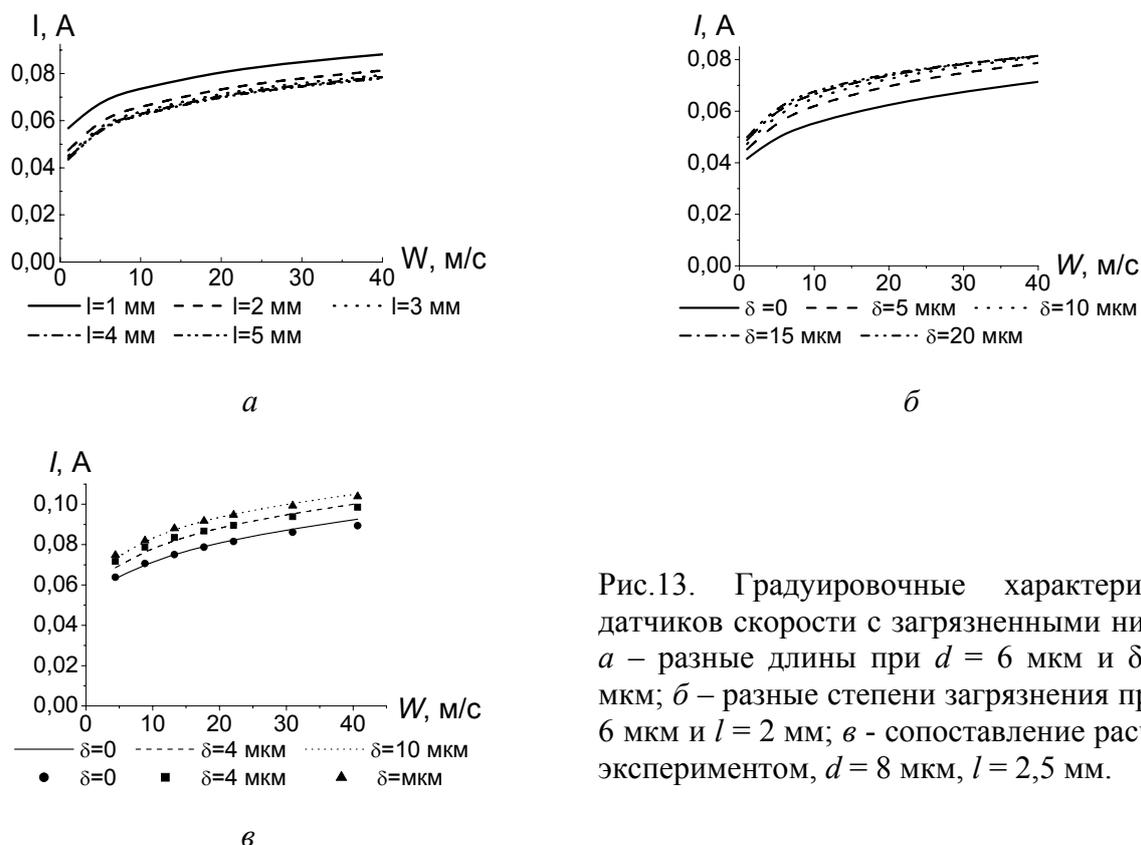


Рис.13. Градуировочные характеристики датчиков скорости с загрязненными нитями: *a* – разные длины при $d = 6$ мкм и $\delta = 10$ мкм; *б* – разные степени загрязнения при $d = 6$ мкм и $l = 2$ мм; *в* – сопоставление расчета с экспериментом, $d = 8$ мкм, $l = 2,5$ мм.

В случае загрязненной нити под АЧХ понималась зависимость K_A от f , где K_A – отношение относительной амплитуды пульсаций тока для загрязненной нити к соответствующей амплитуде для чистой нити. С увеличением толщины загрязняющего слоя δ наблюдается типичное для интегрирующего звена первого порядка ослабление амплитуды (рис.14, *a*). Кривые хорошо обобщаются при использовании в качестве аргумента безразмерного комплекса $f\delta^2/a$ (рис.14,*б*), их расслоение в данном случае происходит из-за отсутствия геометрического подобия (изменение δ при постоянном диаметре нити).

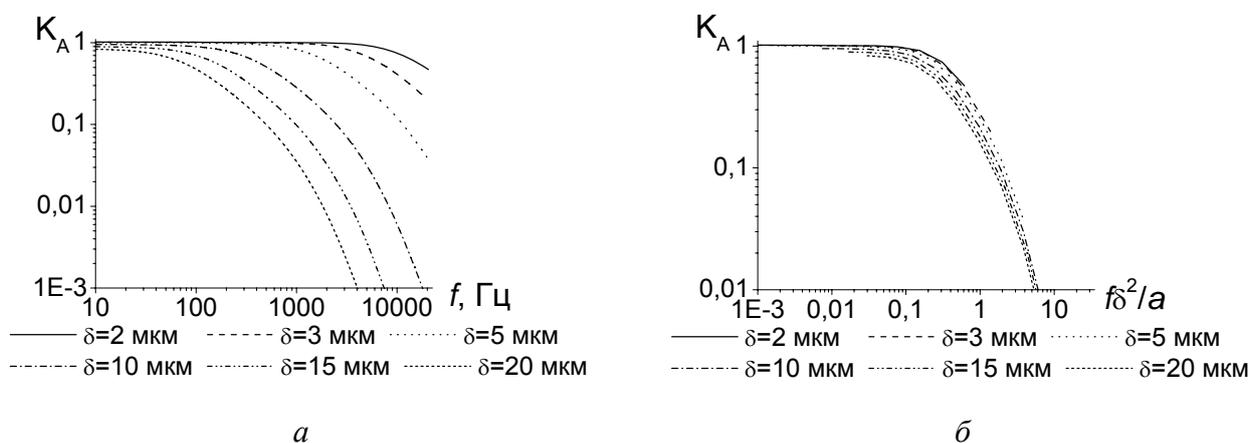


Рис.14. АЧХ датчика скорости с толщиной загрязнения δ : *a* – по частоте f , *б* – по приведенной частоте $f\delta^2/a$.

Получены экспериментальные данные по ослаблению амплитуды пульсаций сигнала загрязненного термоанемометрического датчика скорости (рис.15). Определялось отношение спектров выходного сигнала, оцененных по результатам измерений, выполненных в турбулентном потоке в трубе при одинаковых условиях датчиками с загрязненной и чистой нитями. Обнаружено, что при небольших значениях δ на низких частотах происходит не ослабление, а усиление относительной амплитуды сигнала. Расчет также хорошо согласуется с результатами эксперимента.

На рис. 16 представлена зависимость коэффициента чувствительности выходного сигнала к скорости потока (числу Рейнольдса) от Re , объясняющая выявленный эффект. Как видно, с увеличением Re коэффициент чувствительности увеличивается. Поэтому повышение числа Рейнольдса из-за увеличения диаметра загрязненной нити способствует усилению амплитуды пульсаций тока по сравнению с чистой нитью (при одинаковых пульсациях скорости потока). При больших частотах и толщинах загрязнения это усиление амплитуды подавляется более сильным ослаблением из-за тепловой инерционности слоя загрязнения и уменьшения температуры его наружной поверхности.

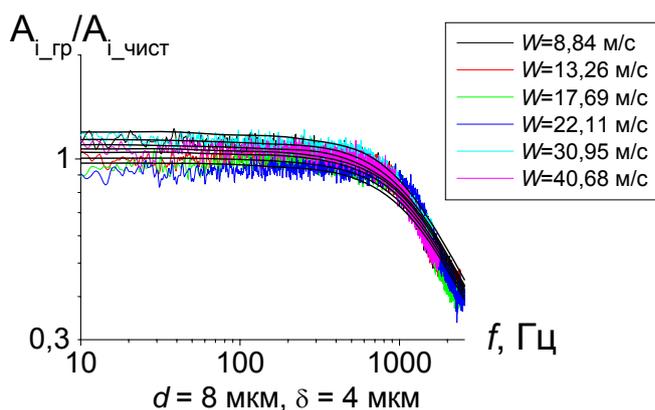


Рис.15. АЧХ термоанемометра с загрязненной нитью: расчет и эксперимент.

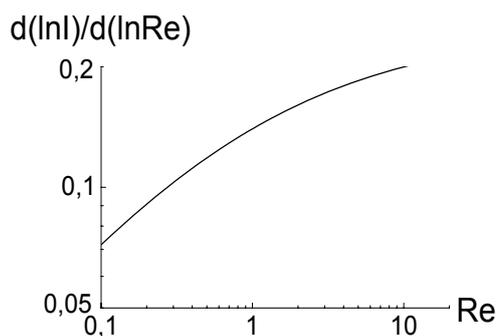


Рис.16. Зависимость коэффициента чувствительности выходного сигнала к скорости потока от Re .

В пятой главе представлены результаты физического и численного моделирования статической и динамической характеристик термоанемометрического детектора вихрей с загрязненной нитью.

Течение в канале перетока вихревого расходомера обладает несколькими особенностями. Скорость газа в нем изменяется по близкому к синусоидальному закону, а среднее ее значение за период срыва пары вихрей близко к нулю. Смена направления движения происходит не одновременно по всей длине нити, расположенной поперек канала перетока, поэтому уровень минимального тока несколько выше, чем в покоящемся газе. Направление потока для сигнала детектора роли не играет.

Расчет показал, что в расходомере воспроизводится эффект роста относительной амплитуды пульсаций сигнала при загрязнении детектора в

области низких частот (рис.17). Как видно из рис.18, значение передаточного коэффициента K_A в области низких частот превышает единицу.

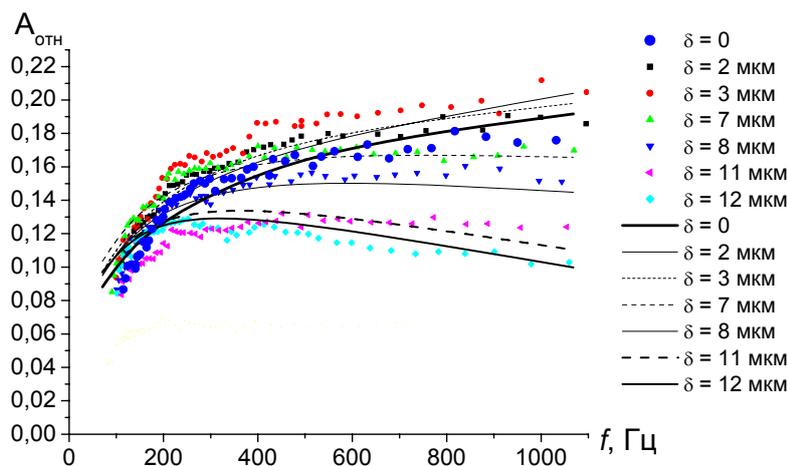


Рис.17. Относительная амплитуда сигнала, линия – расчет, символы – эксперимент, $d = 8$ мкм, $l = 4$ мм.

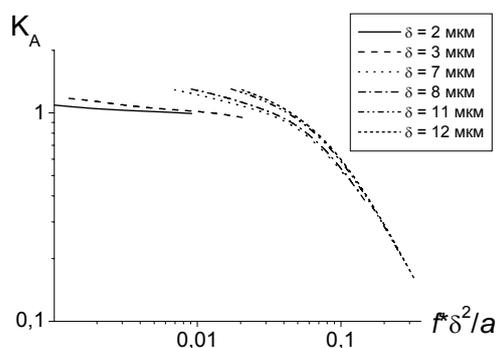
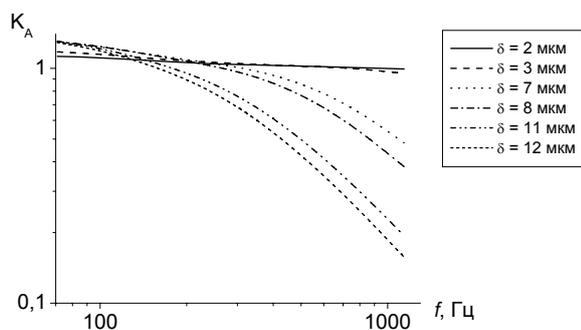


Рис.18. Расчетная АЧХ детектора вихрей с загрязненной нитью:
 а – по частоте f , б – по приведенной частоте $f\delta^2/a$.

Отклонение результатов расчетов от экспериментальных данных не превышало 12%. Математическая модель адекватно воспроизводит физические процессы, происходящие при обтекании чистой и загрязненной термоанемометрической нити в канале перетока вихревого расходомера. На рис.19 представлены результаты экспериментов в виде зависимостей относительной амплитуды от модифицированного числа Рейнольдса $Re_f = \frac{fd^2}{\nu}$, которое часто применяется для вихревых расходомеров и практически пропорционально классическому числу Рейнольдса. Для всех точек по толщине

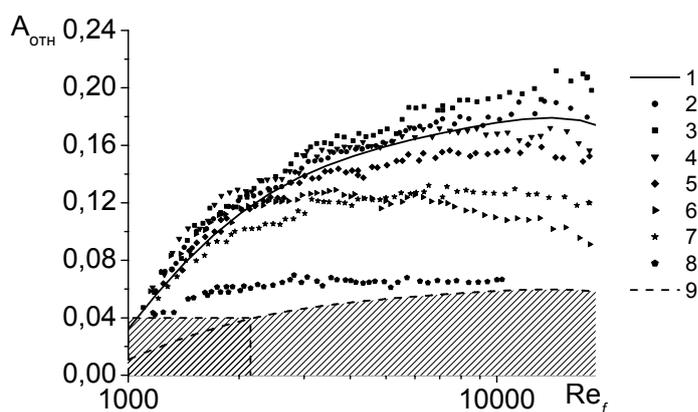


Рис.19. Экспериментальные значения $A_{отн}$ при различных толщинах загрязнения: 1 - чистый датчик; 2 – $\delta = 2$ мкм; 3 – 3мкм; 4 – 7мкм; 5 – 8мкм; 6 – 11мкм, 7 – 12мкм; 8 – 20мкм; 9 – минимальное допустимое значение $A_{отн}$

загрязнения и расходу, представленных на рис.19, влияния на погрешность измерения вследствие ослабления амплитуды сигнала не обнаружено. Полученные экспериментальные данные позволили сформулировать четкий критерий допустимой степени загрязнения нити – относительная амплитуда по сравнению с чистой нитью должна ослабляться не более чем в 3 раза и быть не менее 0.04 (по принятому методу ее определения).

По отношению фактической относительной амплитуды к ее значению для чистой нити при определенной частоте пульсаций можно оценить толщину загрязнения, точнее, комплекс $f\delta^2/a$. Это позволит при эксплуатации расходомера автоматически диагностировать степень загрязнения нити и своевременно формировать сообщение о необходимости промывки датчика.

Наиболее критичным загрязнение нити является в области высоких расходов (частот вихреобразования). Из-за частотно-зависимого влияния загрязнения на амплитуду сигнала для расходомеров с большим условным диаметром (меньшими частотами формирования вихрей) допускается большая толщина загрязнения. Например, для прибора с условным диаметром 200 мм частота вихрей при одинаковой скорости потока в 4 раза ниже по сравнению с Ду50 и допустимая толщина загрязнения, оцененная из равенства $f\delta^2/a$, составит порядка 40 мкм.

Выводы:

1. Разработана математическая модель термоанемометра постоянного сопротивления с загрязненной нитью, работающей в качестве датчика скорости потока и детектора вихрей вихревого расходомера газа. Модель основана на решении методом конечных элементов двумерной задачи теплопроводности с учетом концевых утечек и зависимости тепловыделения от местной температуры нити.
2. На основе предложенной модели и экспериментально получены и обобщены амплитудно-частотные и градуировочные характеристики термоанемометра с загрязненной нитью в качестве датчика скорости и детектора вихрей, оценено влияние факторов загрязнения, подтверждена адекватность модели.

3. Выявлен эффект усиления амплитуды низкочастотных пульсаций термоанемометрическим датчиком с загрязненной нитью, установлен механизм этого явления
4. Предложен метод диагностирования степени загрязнения нити в процессе эксплуатации вихревого расходомера, основанный на выявленной зависимости относительной амплитуды пульсаций тока от этого фактора.
5. Предложен и обоснован критерий допустимого загрязнения чувствительного элемента детектора вихрей, обеспечивающий измерение расхода без дополнительной погрешности от этого фактора. Даны рекомендации по практическому использованию результатов в расходомерии.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ:

Научные статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК:

1. Саховский А.В. Закономерности теплообмена термоанемометрической нити / Н.И. Михеев, А.В. Саховский, К.Р. Хайрнасов и др. // Теплофизика и аэромеханика, 2010 Т.17, №2, стр. 189-196.

2. Саховский А.В. Прогнозирование числа Рейнольдса по сигналу термоанемометрического детектора вихрей вихревого расходомера / Михеев Н.И., Саховский А.В., Кратиров Д.В. // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева, 2010 №2, стр. 14-17.

Работы, опубликованные в других изданиях:

3. Саховский А.В. Теоретические основы термоанемометрических измерений загрязненным датчиком / Н.И. Михеев Н.И., Д.В. Кратиров Д.В., Саховский А.В. и др.// Материалы VI Школы-семинара молодых ученых и специалистов акад. В.Е. Алемасова «Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении», Казань, 16 – 18 сентября 2008 г. – С.197-200.

4. Саховский А.В. Термоанемометрические измерения при загрязнении нити датчика / Михеев Н.И., Кратиров Д.В., Саховский А.В., Хайрнасов К.Р. // Материалы VIII Международной школы-семинара «Модели и методы аэродинамики». Евпатория, 4-13 июня 2008 г. – М.:МЦНМО, 2008. –С.110-111.

5. Саховский А.В. Термоанемометрические измерения датчиком с загрязненным чувствительным элементом // X Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидродинамики», Новосибирск, 18-21 ноября 2008. – С.131-132.

6. Саховский А.В. Термоанемометрический прибор для измерения скорости и температуры потока одним датчиком / Хайрнасов К.Р., Михеев Н.И., Саховский А.В. // Сборник материалов XXI Всероссийской межвузовской

научно-технической конференции «Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках». Казань, 12-14 мая 2009 г.– Казань: Изд-во «Отечество», 2009. Ч.1.–С.38-39.

7. Саховский А.В. Закономерности теплообмена тонких нитей и их использование в цифровом термоанемометре / Саховский А.В., Михеев Н.И., Кратиров Д.В. и др. // Сборник материалов XXI Всероссийской межвузовской научно-технической конференции «Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках». Казань, 12-14 мая 2009 г.– Казань: Изд-во «Отечество», 2009. Ч.1.–С.40-41.

8. Саховский А.В. Закономерности теплообмена термоанемометрической нити / Саховский А.В., Хайрнатов К.Р., Михеев Н.И. и др. // Труды XVII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И.Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в аэрокосмических технологиях» 25-29 мая 2009 г. Жуковский, Россия. М.: Издательский дом МЭИ. Т.1. 2009.– С.141-144.

9. Саховский А.В. Термоанемометрические измерения без градуировки датчика на основе закономерностей теплообмена термоанемометрической нити / Михеев Н.И., Саховский А.В., Хайрнатов К.Р. // Модели и методы аэродинамики. Материалы Девятой Международной школы-семинара. Евпатория, 4-13 июня 2009. – М.: МЦНМО.– 2009. С.126-127.

10. Саховский А.В. Прогнозирование числа Рейнольдса и загрязнения нити термоанемометра в вихревом расходомере / Михеев Н.И., Кратиров Д.В., Саховский А.В. // Модели и методы аэродинамики. Материалы Десятой Международной школы-семинара. Евпатория, 3-12 июня 2010. – М.: МЦНМО.– 2010. С.114-115.

11. Саховский А.В. Двумерное моделирование термоанемометра постоянного сопротивления с загрязненным чувствительным элементом / Кратиров Д.В., Саховский А.В. // Материалы VII Школы-семинара молодых ученых и специалистов акад. В.Е. Алемасова «Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении», Казань, 15 – 17 сентября 2010 г. – С.176-179.

12. Саховский А.В. Цифровой термоанемометр / Саховский А.В., Михеев Н.И., Хайрнатов К.Р. и др. // Материалы Ежегодной научно-практической конференции "Инновации РАН-2010", 1 – 4 июня 2010 г. – С. 183-186.

13. Саховский А.В. Диагностика загрязнения термоанемометрической нити в вихревом расходомере / Кратиров Д.В., Михеев Н.И., Сайкин А.К., Саховский А.В. // Материалы Пятой российской национальной конференции по теплообмену, Москва, 25 – 29 октября 2010 г. – С. 119-122.

14. Саховский А.В. Прогнозирование числа Рейнольдса по теплообмену термоанемометрической нити в канале перетока вихревого расходомера / Кратиров Д.В., Саховский А.В., Стинский Г.В. и др. // Материалы Пятой российской национальной конференции по теплообмену, Москва, 25 – 29 октября 2010 г. – С. 123-126.