



МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М. В. ЛОМОНОСОВА

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ

О.О. ИВАНОВ, В.В. ТРИФОНОВ, В.В. ВЕДЕНЕЕВ

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ В ГИДРОАЭРОДИНАМИКЕ



МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. ЛОМОНОСОВА



Научно-исследовательский институт механики

О.О. Иванов, В.В. Трифонов, В.В. Веденеев

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ В ГИДРОАЭРОДИНАМИКЕ

Учебное пособие



МОСКВА – 2023

УДК 531.7.08:532.5(075.8)

ББК 22.3с:22.253.3я73

И20



<https://elibrary.ru/szdic>

Рецензент:

А.И. Решмин – кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник НИИ механики МГУ

Иванов О.О., Трифонов В.В., Веденеев В.В.

И20

Измерительные приборы в гидроаэродинамике : учебное пособие / О.О. Иванов, В.В. Трифонов, В.В. Веденеев. – Москва : МАКС Пресс, 2023. – 36 с. : ил.

ISBN 978-5-317-06934-6

В учебном пособии описываются принципы работы основных измерительных приборов, используемых при проведении экспериментов в гидроаэродинамике. Рассмотрены приборы для измерения силы, скорости, давления, расхода, способы визуализации течений. Описаны принципы работы АЦП для передачи показаний приборов в компьютер и основы работы в программном комплексе LabView.

Для студентов, аспирантов и научных сотрудников в области гидроаэродинамики и аэродинамики.

Ключевые слова: методы измерений, приборы, эксперимент, гидроаэродинамика, аэродинамика.

УДК 531.7.08:532.5(075.8)

ББК 22.3с:22.253.3я73

O.O. Ivanov, V.V. Trifonov, V.V. Vedeneev

Measuring instruments in hydrodynamics and aerodynamics: tutorial. – Moscow: MAKS Press, 2023. – 36 p.: ill.

ISBN 978-5-317-06934-6

This tutorial describes the operating principles of measuring instruments commonly used in experiments in hydrodynamics and aerodynamics. It reviews the instruments used to measure force, velocity, pressure, and flow rate, and studies flow visualization methods. It also describes the principles of ADC operation to transfer instrument readings to a PC and introduces the basics of the LabView software.

The work is intended for master students, PhD students and researchers in the field of hydrodynamics and aerodynamics.

Key words: measurement methods, measuring instruments, experiment, hydrodynamics, aerodynamics.

ISBN 978-5-317-06934-6

© О.О. Иванов, В.В. Трифонов, В.В. Веденеев, 2023

© Оформление. ООО «МАКС Пресс», 2023

Введение

Данное пособие призвано познакомить студентов, изучающих механику жидкости и газа, с измерительными приборами, используемыми при проведении гидро- и аэромеханического эксперимента. Оно может быть использовано в качестве руководства для проведения практических занятий для студентов механико-математического факультета.

В пособии дан материал для знакомства с основными приборами для измерения силы, скорости, расхода и давления и их практического применения. Приводится информация о механизмах работы АЦП и основ работы в программном комплексе LabView. Предложены задачи для практического применения знаний – тарировка датчика давления и расходомера; измерение профиля скорости струи трубкой Пито; подключение датчика дифференциального давления, проведение измерений и визуализация полученных данных в программе LabView.

Пособие разработано по материалам отчётов о производственной практике, которую проходили студенты механико-математического факультета МГУ А.Б. Порошина, О.Ю. Пономарева и В.В. Быстрицкая в лаборатории экспериментальной гидродинамики НИИ механики МГУ, в связи с чем им выражается благодарность. При подготовке иллюстраций использовались материалы «Альбома течений жидкости и газа» (М. Ван-Дайк, 1986), энциклопедии «Авиация» (под ред. Г.П. Свищёва, 1994), статьи «Структура отрывного обтекания цилиндрической каверны на стенке плоского канала» (М.А. Зубин и А.Ф. Зубков, Изв. РАН. МЖГ, 2022), материалы TACC и Dantec Dynamics. Авторы признательны А.И. Решмину, сделавшему ряд ценных замечаний.

1. Измерение силы и момента, действующих на тело

Для измерения сил и моментов, действующих на тело, находящееся в потоке жидкости или газа, тело подвешивается на специальных упругих подвесах (креплениях), называемых иногда весами. Приложенные со стороны потока силы передаются на подвесы, в которых располагаются чувствительные элементы, воспринимающие и измеряющие действующую силу. Система подвеса тела должна обеспечивать взаимно однозначную связь между измеряемыми компонентами аэродинамической силы и момента и нагрузками, действующими на чувствительные элементы. Как правило, в настоящее время в качестве чувствительного элемента используется тензодатчик, в котором имеется упругий элемент, деформирующийся под действием приложенной силы. Измерение деформации этого элемента пересчитывается в приложенную силу.

Тензодатчик (тензорезисторный датчик) представляет собой устройство, преобразующее измеряемую упругую деформацию твердого тела в электрический сигнал. Это происходит за счет изменения электрического сопротивления проводника датчика при изменении его геометрических размеров от растяжения или сжатия.

Основным элементом тензодатчика (рис. 1) является упругий элемент, деформирующийся пропорционально величине приложенной нагрузки. На упругом элементе наклеен тензорезистор – резистор, изменяющий свое электрическое сопротивление пропорционально деформации упругого элемента. Принцип действия тензодатчика основан на измерении изменения электрического сопротивления тензорезисторов.

Конструкция тензорезистора состоит из:

- 1) проволочной или фольговой решетки из металлической нити диаметром 20–25 мкм;
- 2) подложки – основания, на которое наносится решетка тензорезистора.

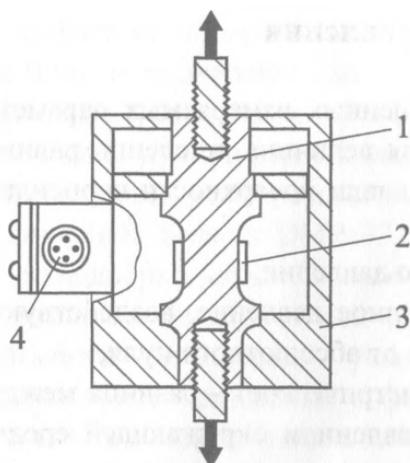


Рис. 1. Конструкция тензодатчика:

1 – упругий элемент, 2 – тензорезистор,
3 – корпус, 4 – кабельный разъём

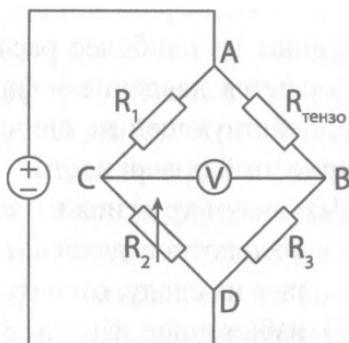


Рис. 2. Мост Уинстона

Как правило, для подключения тензорезисторов используется электрическая схема, называемая мостом Уинстона. Схема позволяет достаточно точно измерять очень малые изменения сопротивлений. Она представляет собой один тензорезистор и три резистора, соединенных как показано на рис. 2. При отсутствии механической деформации все резисторы имеют одинаковое сопротивление, поэтому напряжение между точками В и С (рис. 2) равно нулю. При деформации измеряемой поверхности вместе с наклеенным на неё тензорезистором сопротивление последнего изменяется, и возникает напряжение между точками В и С, пропорциональное величине деформации.

Схема может иметь несколько другой вид: один или все (что бывает чаще всего) резисторы могут быть заменены на тензорезисторы, тем самым обеспечивая бóльшую точность. Также такая схема обеспечивает термокомпенсацию сигнала: при всестороннем расширении или сжатии материала, вызванном изменением его температуры, все резисторы изменяют сопротивление на одинаковую величину, поэтому напряжение между точками В и С останется нулевым. Таким образом будет измерена только деформация, отличная от всестороннего теплового расширения или сжатия.

2. Измерение давления

Одним из наиболее распространенных измеряемых параметров является давление – физическая величина, численно равная силе, действующей на единицу площади поверхности перпендикулярно этой поверхности.

Различают три типа измеряемого давления:

- 1) абсолютное давление – истинное давление, действующее на среду, отсчитываемое от абсолютного нуля;
- 2) избыточное давление (манометрическое) – разница между абсолютным давлением и давлением окружающей среды (часто – атмосферным давлением);
- 3) дифференциальное давление – разность давлений между двумя точками.

Датчики давления классифицируются на основе того, какое давление измеряется: датчики абсолютного давления, датчики избыточного давления, датчики дифференциального давления. Каждый из них имеет преимущества в определенных ситуациях.

Существует несколько основных факторов, влияющих на пригодность конкретного датчика давления для конкретного процесса:

- 1) характеристики веществ, в среде которых будет использоваться устройство;
- 2) условия окружающей среды;
- 3) пределы измерений;
- 4) уровень точности, требуемый в процессе измерения.

Датчики абсолютного давления (рис. 3) – это приборы для измерения давления воздуха, других газов, жидкостей, отсчитываемого от нуля давлений, т.е. от абсолютного вакуума.

В основе конструкции датчика абсолютного давления лежит чувствительный элемент (сенсор). С одной стороны сенсора расположена вакуумная камера, из которой на этапе изготовления датчика был откачан воздух. С другой стороны на сенсор воздействует давление газа или жидкости, подаваемых через штуцер. Получая сигнал от сенсора, электронный блок усиливает его и преобразует в выходной сигнал датчика. Существуют аналоговые

и цифровые датчики давления. Цифровой датчик давления оснащен преобразователем аналогового сигнала в цифровой. Оба типа датчиков, как правило, должны быть снабжены электропитанием.

Одной из популярных моделей датчиков абсолютного давления является универсальный общепромышленный мембранный датчик BD Sensors DMP 331 (и его аналоги). Работа датчиков всех подобных моделей основана на преобразовании измеряемого давления в электрический сигнал с помощью чувствительного элемента – мембраны, – усилении этого сигнала в электронном блоке и преобразовании в форму, удобную для дистанционной передачи в виде сигнала постоянного тока, напряжения или цифрового сигнала.

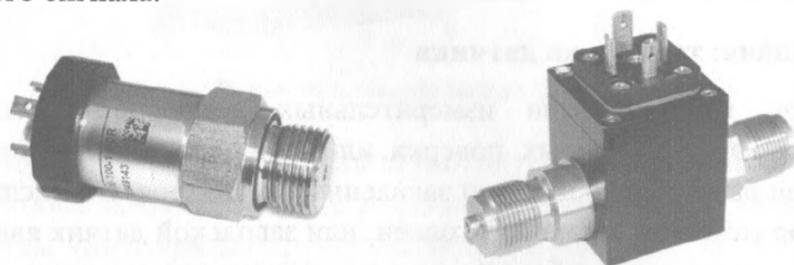


Рис. 3. Абсолютный датчик – слева, дифференциальный датчик – справа

Датчики дифференциального давления (рис. 3) – датчики разности давления. В датчиках данного типа давление подается на обе стороны измерительной мембраны, а выходной сигнал зависит от разности давлений. Корпус такого датчика имеет два присоединительных штуцера: «плюсовой» и «минусовой». Если давление среды, приложенное к плюсовому штуцеру, больше давления среды в минусовом штуцере, то датчик покажет разницу (перепад) давлений со знаком плюс. Если к плюсовому штуцеру приложено меньшее давление, чем к минусовому, то перепад будет со знаком минус. Но нередко случай отрицательных перепадов не входит в диапазон измерений дифференциальных датчиков, что важно учитывать при создании экспериментальных стендов.

Чувствительным элементом мембранных датчиков является упруго деформируемая измерительная мембрана с закрепленными на ней тензорезисторами, с помощью которых измеряется деформация мембраны. Измерительная мембрана изолирована от

рабочей среды, а давление среды прикладывается к защитным мембранам, расположенным с обеих сторон от измерительной мембраны. Полости между защитными и измерительной мембранами заполнены специальной жидкостью. Под действием приложенных давлений защитные мембраны деформируются, деформируя измерительную мембрану – вслед за ней деформируются расположенные на ней тензорезисторы. Вследствие деформации изменяется электрическое сопротивление тензорезисторов. Это изменение сопротивления воспринимается электрической схемой датчика и преобразуется в значение выходного аналогового сигнала. В воздушных мембранных датчиках защитные мембраны обычно отсутствуют.

Задача: тарировка датчика

При использовании измерительных приборов регулярно должны проводиться их поверки или калибровки для подтверждения работоспособности и заявленных характеристик. Если же прибор самостоятельно изготовлен, или заводской датчик является частью нового прибора (например, датчики силы в многокомпонентных весах в аэродинамической или гидродинамической трубе), то необходимо произвести его градуировку, или тарировку. Данная задача моделирует такую ситуацию, а в качестве прибора используется датчик дифференциального давления. Для тарировки датчика используется манометрический пресс (рис. 4) – устройство, предназначенное для создания избыточного давления, которое при наличии образцового измерительного средства (манометра или другого датчика) может быть использовано для поверки и тарировки рабочих датчиков.

Перед началом работы проверяется уровень масла в бачке. Далее, вращая маховик по часовой стрелке, плавно повышается давление, с определенным шагом фиксируются показания образцового манометра и тарируемого датчика давления. При достижении максимального давления, определяемого планом тарировки, давление уменьшается путем вращения маховика прессы против часовой стрелки, и процедура повторяется. Необходимо сделать 3–5 таких циклов с ~10 точками в цикле.

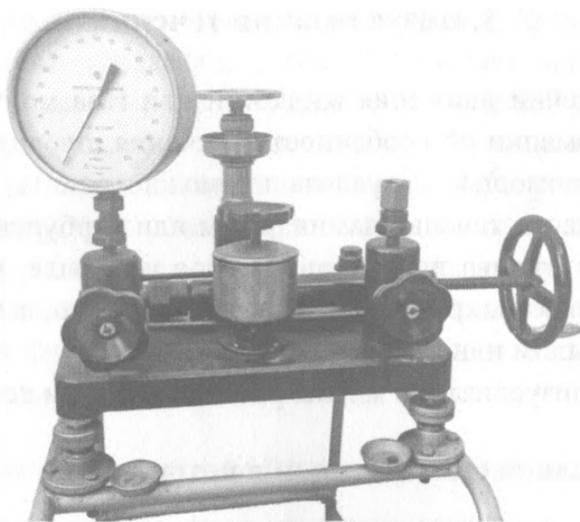


Рис. 4. Манометрический пресс

По результатам тарировки строится график. По вертикальной оси откладываются величины давления, создаваемого масляным прессом (по показаниям образцового манометра), по горизонтальной оси – показания тарируемого датчика. Полученные значения аппроксимируются прямой, ее наклон сравнивается с паспортным значением. При необходимости вносится коррекция в формулу пересчёта показаний датчика к истинному значению давления. Отклонением значений от аппроксимирующей прямой определяется случайная погрешность измерений датчика.

3. Визуализация течений

При изучении движения жидкости или газа можно получать много информации об особенностях течения, проводя его визуализацию. С помощью визуализации можно понять, является ли в данной области течение ламинарным или турбулентным, обнаружить зоны отрыва пограничного слоя на крыле, идентифицировать крупные вихревые структуры, например, в следе за цилиндром, крылом или самолетом.

Методы визуализации можно разделить на три категории.

Визуализация с добавлением в поток частиц

Частицы, введенные в поток, начинают двигаться вместе с ним, причем их скорость совпадает со скоростью частиц потока. В воздух обычно добавляется дым, капельки масла или другой аэрозоль, а в воду – пластиковые частицы, полые микросферы, пузырьки газа.

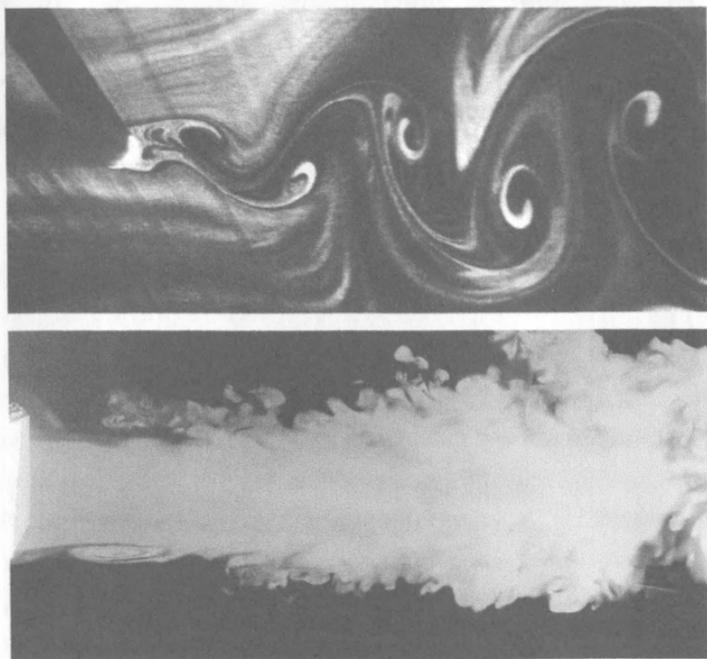


Рис. 5. Визуализация течения:
вихревая дорожка Кармана за цилиндром (сверху); истечение струи (снизу)

Подача дыма или пузырьков в одной точке (формируя струйку) или по линии (создавая плоскость) позволяет выделить линию тока в потоке или их набор. Если засеивать целый поток, то для выделения интересующей плоскости используется лазерный нож: лазерный луч с помощью цилиндрической линзы разворачивается в сектор, который подсвечивает только частицы, находящиеся в плоскости лазерного ножа. Примеры визуализации даны на рис. 5: сверху показана вихревая дорожка Кармана за цилиндром, полученная в аэродинамической трубе, снизу – истечение затопленной струи из прямоугольного сопла.

Визуализация течения на поверхности тела

К данным методам относится использование шелковинок, капель или плёнки масла (саже-масляная визуализация), которые нанесены на поверхность и помогают получить предельную, на поверхности тела, картину течения, или специальных покрытий и красок, способных визуализировать поля давления, температуры или трения. Метод шелковинок распространен при экспериментах с крупными моделями крыльев и самолётов для демонстрации линий тока и зон отрывного течения. Поверхность модели покрывается пучками нитей, которые при обтекании выстраиваются вдоль линий тока, близких к поверхности (рис. 6).

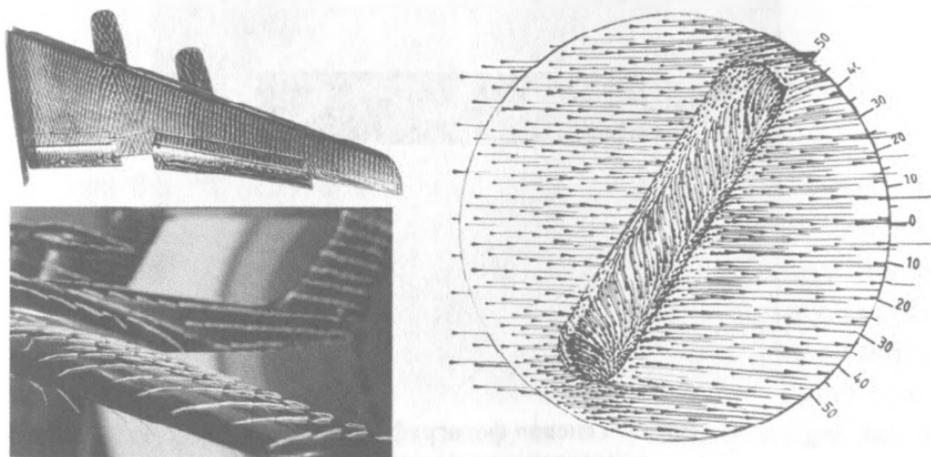


Рис. 6. Визуализация течения шелковинками (слева) и подкрашенными каплями масла (справа)

Саже-масляный метод основан на том, что капли или неоднородно подкрашенные слои масла растекаются по поверхности вдоль линий действия касательных напряжений, которые соответствуют идущим вблизи поверхности линиям тока (рис. 6). Его удобно использовать в экспериментах в аэродинамических трубах, в том числе сверхзвуковых.

Оптические методы

Эти методы основаны на том, что объемы воздуха, имеющие отличный от окружающих показатель преломления (как правило, в силу другой температуры), отклоняют световой луч от первоначального направления распространения. К оптическим относятся шпирен-метод или более простой вариант – теневой метод визуализации. Пример применения данного метода для визуализации сверхзвукового полета тела с заостренным носом дан на рис. 7: с головы сходит ударная волна, по телу можно различить слабые ударные волны, и в кормовой зоне – структуру следа.

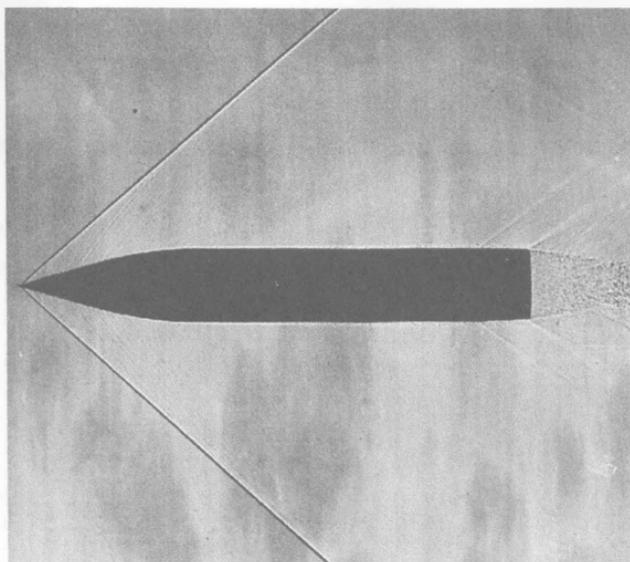


Рис. 7. Теневая фотография цилиндра с заостренным носом в полете

Рассмотрим подробнее принципы этих методов. От источника свет попадает на линзу, которая формирует параллельный пучок. Проходя через рабочую область течения, лучи света слегка отклоняются от своего изначального направления из-за неоднородностей плотности. Если непосредственно за рабочей областью установить экран, то на нем можно будет различить некоторые черты течения – неоднородности (например, ударная волна) дадут тени на фоне (рис. 7). В этом заключается простейшая схема теневого метода.

Данную схему можно улучшить до шпирен-метода (его также называют методом Теплера), если за рабочей зоной перед экраном поставить собирающую линзу (рис. 8).

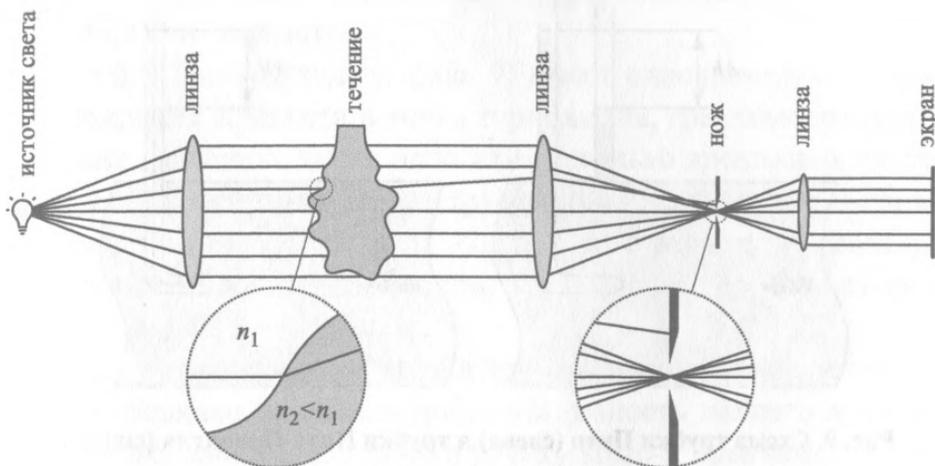


Рис. 8. Схема шпирен-метода

Если бы свет не проходил через неоднородности плотности, то все лучи пересеклись бы в фокусе собирающей линзы. Однако при наличии неоднородностей часть лучей не пройдет через фокус. Установив в фокусе препятствие – «нож», – которое перекрывает часть отклонившихся лучей, на экране мы получим картину, соответствующую неоднородностям потока, тем самым произведя визуализацию шпирен-методом. За счет обрезания части лучей изображение становится менее ярким, но более контрастным, выделяя более тонкие детали течения.

4. Способы измерения скорости жидкости и газа

В задачах движения жидкости и газа важно знать, с какой скоростью и в каком направлении движется среда. Это может быть использовано для определения скорости движения самолетов, судов, определения характеристик пограничного слоя и мест его отрыва от поверхности, правильного функционирования технологических аппаратов, систем теплоснабжения и т.д.

Рассмотрим распространенные методы измерения скорости в точке.

Трубки Пито и Пито-Прандтля

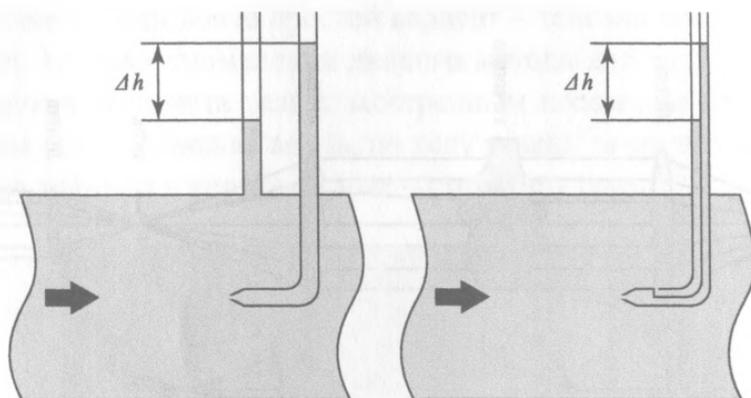


Рис. 9. Схема трубки Пито (слева) и трубки Пито-Прандтля (справа)

Трубка Пито и ее более продвинутый вариант – трубка Пито-Прандтля – является наиболее простым и распространенным способом измерения скорости потока. Ее также называют трубкой полного напора, т.к. она позволяет измерить полное давление, или полный напор, в жидкости. Для этого используется Г-образная трубка, которая помещается в поток так, чтобы открытый торец трубки был строго перпендикулярен набегающему потоку. Жидкость или газ тормозится до нулевой скорости у торца трубки Пито (рис. 9), таким образом динамическое давление переходит в статическое, которое в точке торможения равняется полному давлению. Если измерить статическое давление

(т.е. действительное давление в движущейся среде) в потоке, например, сделав дренажное отверстие в стенке трубы, то по разности полного и статического давлений из интеграла (уравнения) Бернулли можно найти скорость потока в данной точке:

$$P_{\text{стат}} + \frac{\rho_0 v^2}{2} = P_{\text{стат}} + \rho_0 g \Delta h = P_{\text{полн}},$$

$$v = \sqrt{\frac{2}{\rho_0} (P_{\text{полн}} - P_{\text{стат}})},$$

где ρ_0 – плотность среды (которая в данном примере считается несжимаемой). В современных приборах разность полного и статического давлений измеряется дифференциальным датчиком давления или манометром.

Трубка Пито-Прандтля (рис. 9) имеет одновременно с отбором давления жидкости в точке торможения, где давление равно полному давлению, также одно или несколько дренажных отверстий на боковой поверхности трубки, где давление равно статическому. Таким образом, и полное, и статическое давление воспринимается одним прибором, что позволяет определить скорость в данной точке потока.

Если проводить измерения в трубе с текущей жидкостью, то можно наглядно продемонстрировать разность полного и статического давлений: подсоединив трубку Пито и дренажное отверстие в стенке трубы к прозрачным трубкам и расположив их рядом, можно увидеть разницу в уровнях жидкости Δh (рис. 9). Соответствующая разность гидростатических давлений $\rho_0 g \Delta h$ равна динамическому давлению (т.е. разности полного и статического давления) и может напрямую использоваться для определения скорости по приведённой выше формуле.

Термоанемометр

Термоанемометр (ТА) – это прибор для измерения скорости потока жидкости или газа, принцип действия которого основан на зависимости между скоростью набегающего потока и теплоотда-

чей миниатюрной проволоочки, помещённой в поток и нагретой за счет протекания электрического тока. Проволочка (металлическая нить) обычно имеет длину 1–3 мм и диаметр 2–10 мкм и размещается на маленьких электропроводных стержнях, к которым она приварена. Такая конструкция называется датчиком ТА, которую, используя державки, можно помещать в поток для измерения скорости. Основная часть ТА – измерительный мост Уинстона (рис. 10), в одно плечо которого включён датчик ТА. Проволочка датчика ТА обтекается средой, охлаждая ее. Количество теплоты, передаваемой нагретой проволоочкой потоку жидкости (газа), взаимно однозначно соответствует скорости потока при данных физических характеристиках среды. С увеличением температуры проволоочки (т.н. перегрева) чувствительность термоанемометра увеличивается.

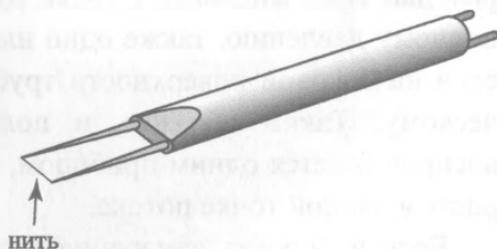
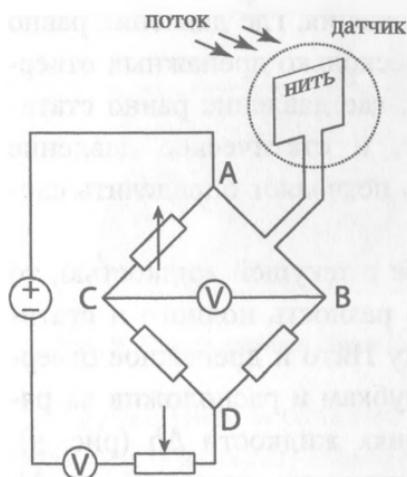


Рис. 10. Электрическая схема термоанемометра (слева) и датчик термоанемометра (справа)

Датчик термоанемометра включается в электрическую схему термоанемометра. Различают приборы с поддержанием постоянного тока, постоянного напряжения и постоянной температуры проволоочки. В двух первых методах скорость потока однозначно соответствует температуре проволоочки, которая определяет её электрическое сопротивление, в последнем – напряжению, требуемому для поддержания постоянной температуры и, следовательно, постоянного сопротивления датчика.

Благодаря быстрой реакции на изменение скорости, высокой чувствительности и малым размерам датчика, термоанемометры повсеместно используются для исследования неустановившихся движений и течений в пограничных слоях вблизи стенки, в частности, для исследования турбулентности.

Лазерный доплеровский анемометр

Лазерный доплеровский анемометр (ЛДА) – это прибор для бесконтактного измерения скорости среды в заданной точке. Для таких приборов иногда также используют аббревиатуру ЛДИС (лазерный доплеровский измеритель скорости). В отличие от трубки Пито и термоанемометра, для измерения скорости поток должен содержать небольшие (диаметром $\sim 0.1\text{--}100$ мкм) частицы, которые будут двигаться вместе с потоком.

Принцип действия ЛДА заключается в следующем (рис. 11). В некоторой точке пересекаются два лазерных луча, испускаемых излучателем прибора, тем самым формируя измерительный объем. Т.к. излучаются волны с постоянной длиной, в месте их пересечения создается интерференционная решетка, причем линии максимумов и минимумов параллельны оси прибора. При пересечении данной решетки маленькой частицей, взвешенной в потоке, фотоприемник прибора фиксирует отраженный поверхностью частицы сигнал. Интенсивность отражённого сигнала пропорциональна локальной интенсивности света, т.е. выше и ниже при пересечении линий максимума и минимума решётки, соответственно. Определяя с помощью преобразования Фурье основную частоту отражённого сигнала и умножая её на известное расстояние между линиями максимумов (определяется оптической схемой), получаем компоненту скорости движения одной частицы. Скорость потока определяется на основе многократных повторных измерений скоростей частиц, проводимых с высокой частотой.

Главные преимущества ЛДА – бесконтактный характер измерений, что позволяет проводить их в любых, в т.ч. агрессивных, средах, и отсутствие необходимости регулярной тарировки.

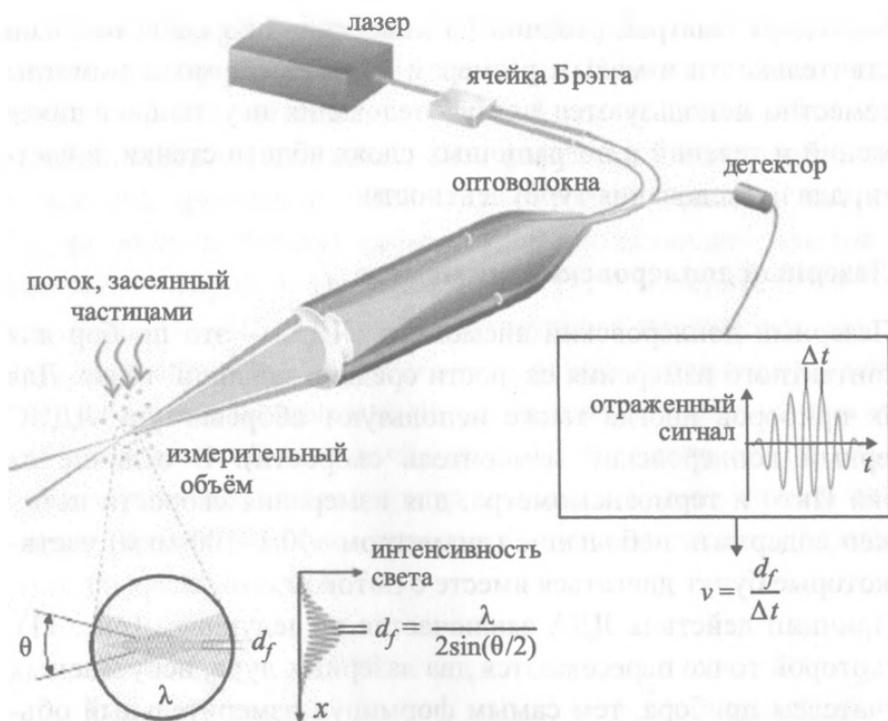


Рис. 11. Схема лазерного доплеровского анемометра

Particle Image Velocimetry

Метод Particle Image Velocimetry (PIV), или цифровой трассерной визуализации – бесконтактный метод измерения скорости в потоках. В отличие от термоанемометра и лазерного доплеровского анемометра, измеряющих скорость в одной точке, этот метод позволяет получить мгновенные пространственные распределения скорости. Данное преимущество является особенно важным при изучении потоков, содержащих крупномасштабные вихревые структуры, информация о которых частично теряется при применении одноточечных методов измерений. Кроме того, к значимым преимуществам относят широкий диапазон измеряемых скоростей – от очень малых (например, в микроканалах) до сверхзвуковых.

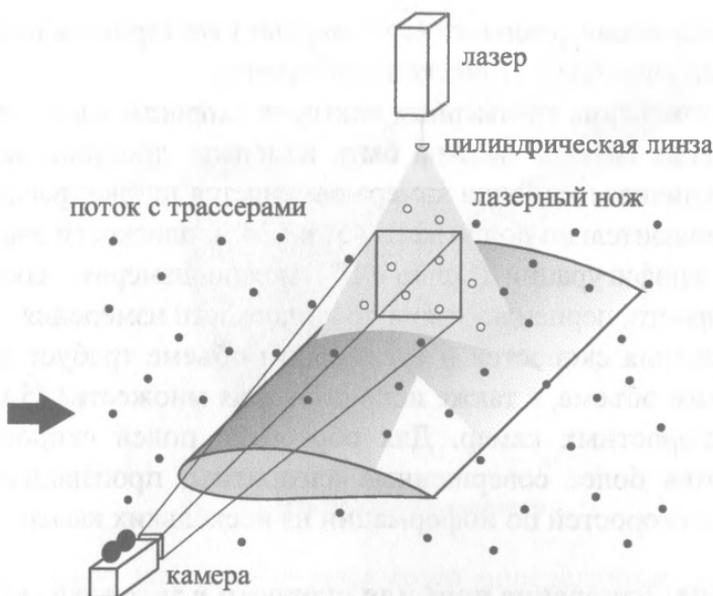


Рис. 12. Схема измерения поля скорости за препятствием с помощью PIV

Измерение мгновенного поля скорости потока в заданном сечении основано на измерении перемещения частиц примеси, находящихся в плоскости сечения, за фиксированный интервал времени. В поток жидкости или газа добавляются частицы малого размера (трассеры). Размер, плотность и объемная концентрация частиц подбираются таким образом, чтобы эффекты, связанные с двухфазностью потока и плавучестью частиц, были минимальны. В качестве трассеров используют аэрозоли из частиц масла или глицерина, частиц оксида титана – для воздуха, и пустотелые стеклянные сферы, полиамидные частицы или пузырьки воздуха – для воды. Измерительной областью потока (рис. 12) считается плоскость, «вырезаемая» лазерным ножом. Частицы в измерительной плоскости потока должны быть освещены лазером в два последовательных момента, в которые образы частиц регистрируются высокоскоростной камерой. Последующая обработка изображений позволяет рассчитать смещения частиц за время между вспышками лазера и построить двухкомпонентное поле скорости. Измеренные значения векторов явля-

ются проекциями реальных (трехмерных) векторов на плоскость, перпендикулярную оптической оси камеры.

Для измерения трехмерных векторов скорости в плоскости измерительная система должна быть изменена: толщина лазерного ножа увеличивается, одна камера заменяется на две, расположенные приблизительно под углами 45° и 135° к плоскости измерения. В такой конфигурации (Stereo PIV) можно измерить составляющую скорости, перпендикулярную к плоскости измерения.

Измерения скоростей в трехмерном объеме требует засветки всего этого объема, а также использования множества (5 и более) высокоскоростных камер. Для обработки полей скоростей используются более совершенные алгоритмы, производящие вычисление скоростей по информации из нескольких камер.

Задача: измерение профиля скорости в затопленной струе

Целью задачи является измерение среднего профиля продольной скорости в затопленной струе с помощью трубки Пито, подсоединенной к манометру. Манометром называют прибор, показывающий давление в некоторой точке, а дифференциальным манометром – разность давления между двумя точками. Одна из этих точек обычно является исследуемой, а в другой давление известно заранее или легко может быть определено (например, атмосферное давление).

Жидкостной наклонный манометр, или микроманометр, служит для измерения малых разностей давления. Он представляет собой прибор, в котором имеется стеклянная измерительная трубка, наклон которой может изменяться (рис. 13). К нижнему концу трубки подсоединяется бачок, обычно заполненный спиртом, в который, в свою очередь, подаётся измеряемое давление. Верхний конец трубки сообщается с атмосферой. Трубка Пито соединяется с «положительным» штуцером (с бачком), поэтому под действием приложенного давления столб жидкости в трубке будет подниматься. Для каждого угла наклона измерительной трубки известен коэффициент α , на который необходимо умножить высоту столба жидкости, чтобы получить значение измеряемого давления.

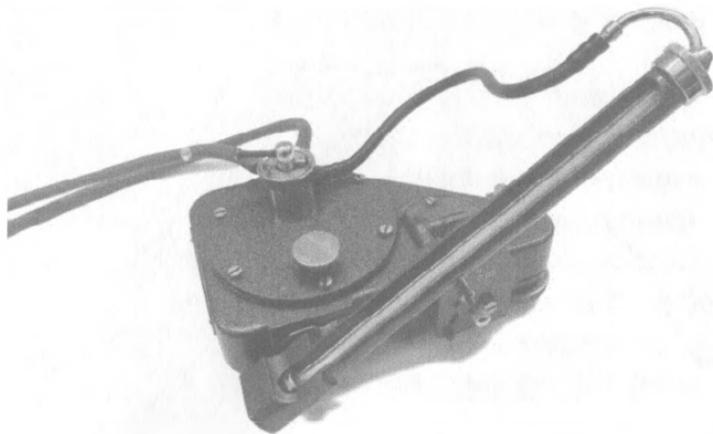


Рис. 13. Наклонный манометр

С помощью наклонного манометра определяется динамическое давление в струе по формуле для гидростатического давления:

$$\frac{\rho_0 v^2}{2} = P - P_{\text{стат}} = \alpha \rho_{\text{ман}} g (h - h_0),$$

где $\rho_{\text{ман}}$ – плотность жидкости (спирта), по которой необходимо находить гидростатическое давление (обычно это давление измеряется в миллиметрах водяного столба, но это следует уточнить в паспорте используемого прибора), h и h_0 – показания микроманометра во время измерения скорости и при нулевой скорости, соответственно.

Отсюда скорость находится в следующем виде:

$$v = \sqrt{\frac{2\alpha \rho_{\text{ман}} g (h - h_0)}{\rho_0}}.$$

Обычно значения коэффициента α , указанные на позициях наклона манометра, уже учитывают плотность жидкости в манометре, поэтому ее величину в формулу для скорости ставить не надо, контролируя при этом значение плотности, которое указано на корпусе манометра.

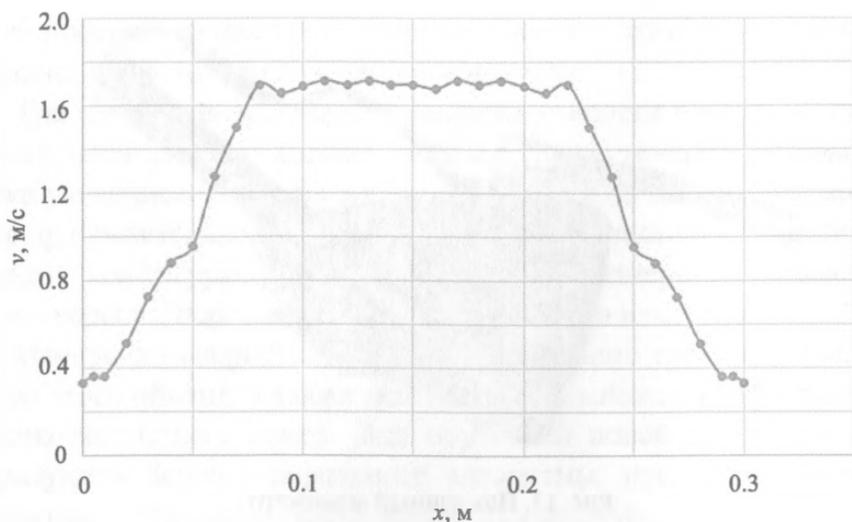


Рис. 14. Профиль скорости в струе

В качестве задачи предлагается, используя трубку Пито и подключенный к ней наклонный манометр, осуществить измерения профиля скорости затопленной струи, сделав 20–30 измерений в равномерно распределенных точках в плоскости, проходящей через ось трубы, а также по этому профилю найти объемный расход газа. Пример измеренного профиля скорости в струе приведен на рис. 14.

5. Измерения расхода жидкости или газа

Измерение расхода жидкости или газа можно производить определением поля скорости и дальнейшим его интегрированием. Но это не всегда удобно, быстро и вообще осуществимо. Поэтому для данной цели используют расходомеры. Расходомер – прибор, измеряющий объемный или массовый расход вещества, проходящий через данное сечение (обычно – сечение трубопровода) в единицу времени. Существует большое количество различных типов расходомеров, основные из которых рассмотрены ниже.

Механические счётчики расхода

Действие таких расходомеров основано на механическом измерении объема среды, проходящего через расходомер. В частности, шестерёнчатые расходомеры устроены следующим образом: две плотно сопряженные между собой шестерни расположены в корпусе расходомера, образуя закрытую камеру. Среда, протекая через камеру, приводит шестерни в движение, заставляя их вращаться. Частота оборотов шестерёнок пропорциональна расходу жидкости и выдается в форме электрических импульсов. Такие расходомеры универсальны по отношению к реологии среды и применяются для измерения расхода высоковязких сред: масел, жиров, смол, лаков и пр.

Ротаметры

Такой расходомер состоит из прозрачной конической трубки, расширяющейся вверх, внутри которой находится поплавко-индикатор. Поток жидкости или газа проходит через трубку снизу вверх и поднимает поплавок в некоторое положение равновесия. При увеличении расхода увеличивается и высота положения поплавка: из-за увеличения сечения трубки поплавок занимает новое, более высокое, положение равновесия, которое показывает новый уровень расхода. Величина расхода соответствует уровню, занятому поплавком, который определяется по рискам, нанесённым на поверхность трубки.

Турбинные расходомеры

Принцип работы основан на протекании вещества, вызывающего вращение крыльчатки, скорость вращения которой пропорциональна величине расхода и определяется по частоте электрических импульсов, выдаваемых при каждом обороте крыльчатки.

Турбинный расходомер предназначен для точных измерений расхода жидкостей с низким коэффициентом вязкости. Преимуществом данного расходомера является нечувствительность к изменениям давления, температуры и состава среды.

Ультразвуковые расходомеры

Расходомеры такого типа измеряют разницу между интервалами времени, которые два сигнала проходят через сечение трубы, занятое потоком. Два ультразвуковых сенсора, расположенные по диагонали напротив друг друга, работают попеременно как излучатель и приёмник. Акустический сигнал, поочередно генерируемый обоими сенсорами, в силу эффекта Доплера ускоряется, когда направлен по потоку, и замедляется, когда направлен против потока. Измеренная разница во времени прямо пропорциональна средней скорости потока. Преимущества ультразвуковых расходомеров: отсутствие гидравлического сопротивления, надежность (ввиду отсутствия движущихся частей), быстрое действие.

Задача: тарировка ультразвукового расходомера

Для знакомства с расходомерами предлагается произвести тарировку ультразвукового расходомера КАРАТ-520. Этот расходомер выдает электрический импульс при прохождении определенного объема жидкости. В рамках задачи необходимо сравнить значения расхода, определяемые двумя способами: расходомером и измерением расхода мерной емкостью и секундомером.

На конце трубопровода экспериментальной установки имеется вентильный кран, позволяющий регулировать режим движения в трубе (расход). Измерение расхода производится одновременно

при помощи секундомера и ведра объемом 10 литров (Q_b), и ультразвукового расходомера (Q_{ul}). Положение крана варьируется ~10 раз, делается несколько циклов измерений. Полученные данные приводятся в таблице и на графике в осях $Q_b - Q_{ul}$. С помощью линейной интерполяции замеренных точек находятся тарифовочные коэффициенты и относительная погрешность измерений.

6. Сбор и обработка сигналов от датчиков

В этом разделе даются краткие сведения об аналого-цифровых преобразователях и о языке программирования LabView, который можно использовать для сбора и обработки информации от датчиков.

Аналого-цифровой преобразователь

Аналого-цифровые преобразователи (АЦП) являются приборами, которые физическую величину превращают в соответствующее ей числовое представление. В качестве входных сигналов АЦП выступают выходные электрические сигналы датчиков: сила тока, напряжение, частота импульсов и так далее. Часто в электросхему между датчиком и АЦП вводится усилитель электрического сигнала (если он не встроен непосредственно в датчик) для приведения сигнала датчика к рабочему диапазону АЦП и для повышения точности работы последнего.

Обычно выделяют следующие типы АЦП:

- 1) с прямым преобразованием;
- 2) с последовательным приближением;
- 3) с параллельным преобразованием.

Есть также много других типов, обладающих своими особенностями и архитектурой.

Прямые АЦП

АЦП прямого преобразования представляют собой элементарные устройства, на основе которых функционируют более эффективные АЦП последовательного приближения.

АЦП прямого преобразования состоит из следующих основных компонентов:

- 1) цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП);
- 2) счётчик;
- 3) устройство сравнения (компаратор);
- 4) устройство управления.

АЦП последовательно воспроизводит все возможные значения аналогового сигнала и сравнивает их с входным сигналом. При совпадении сигналов АЦП выдаёт значение сигнала, соответствующее входной измеряемой величине.

АЦП функционирует по следующему принципу. На первом шаге устройство управления задаёт нулевое значение счётчика. Затем происходит последовательное увеличение значения на выходе счётчика на 1. Выходное значение счётчика поступает в цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП). В случае близости выходного сигнала ЦАП с входным сигналом, определяемой компаратором, устройство управления прекращает счёт, и полученное значение принимается равным измеряемому.

АЦП последовательного приближения

Принцип работы таких устройств заключается в том, что измеряемая величина входного сигнала сравнивается с числами, генерируемыми в следующем порядке:

1. Устанавливается среднее значение между нулём и максимальным возможным значением.
2. Если сигнал превысил значение п. 1, то проводится сравнение со значением, лежащим посередине между оставшимся значением.
3. Далее последовательно повторяется п. 2 до достижения необходимой точности измерения.

Указанный принцип обеспечивает высокую скорость оцифровки измеряемой величины.

Параллельные АЦП

Особенность параллельных АЦП в том, что они включают в себя массив одновременно работающих компараторов, что ускоряет процесс одновременной оцифровки нескольких измеряемых величин. Каждый компаратор сравнивает измеряемое и опорное напряжение.

Передача данных из АЦП в ПК

Для передачи показаний датчиков в персональный компьютер (ПК) датчики подключаются к АЦП, а АЦП, в свою очередь – к ПК. Запущенная на ПК программная среда LabVIEW получает доступ к данным, получаемым с АЦП, и предоставляет инструменты для их обработки.

В среде LabVIEW результаты измерения, поступающие от каждого датчика, представляются в виде чисел заданного формата. Эти числа поступают с частотой дискретизации сигнала, определяемой АЦП. Без привязки ко времени результат измерения за определённый временной интервал представляет собой массив чисел: одномерный массив, если измерения ведутся по одному каналу, или двумерный массив, если каналов несколько. Кроме того, в LabVIEW существует специальный тип данных – Waveform, содержащий, помимо массива результатов измерения, также время начального измерения и временной шаг измерений. Использование этого типа данных удобно при обработке сигналов, т.к. он сохраняет привязку результатов измерения ко времени.

Основы программирования

Программа, написанная в среде LabVIEW, называется Virtual Instrument (VI) – виртуальный прибор (ВП). ВП симулирует реальные физические приборы, например, датчик давления.

Разработка программ проводится с помощью графического интерфейса в двух окнах: Front Panel (лицевая панель) и Block Diagram (блок-диаграмма).

Лицевая панель ВП служит для создания элементов управления и отображения, которые используются для ввода и вывода данных этого виртуального прибора в удобном для пользователя виде.

Элементы управления (Controls) – кнопки, рукоятки, численные значения входных параметров, параметров обработки сигнала и т.п.

Элементы отображения (Indicators) – графики, столбчатые индикаторы, числовые значения и другие элементы, наглядно показывающие результат обработки сигнала.

Элементы управления передают заданные пользователем параметры на блок-диаграмму ВП. Блок-диаграмма представляет собой программу, построенную с помощью графического интерфейса, которая определяет последовательность обработки «сырых» результатов измерений, полученных с АЦП, и характер отображения результатов на лицевой панели. Элементы отображения показывают в удобном для пользователя виде результаты измерения, которые получают из блок-диаграммы (рис. 15).



Рис. 15. Графическая среда программирования LabVIEW

Объекты лицевой панели (элементы управления и отображения) представляются на блок-диаграмме в виде терминалов данных (Data terminals), с помощью которых происходит передача данных между лицевой панелью и блок-диаграммой.

Узлы (Node) – это объекты на блок-диаграмме, которые имеют одно или более полей ввода/вывода данных и выполняют операции по обработке поступающих в них данных.

Данные между объектами блок-диаграммы передаются по соединительным линиям – проводникам данных (Wires).

Программа, показывающая значения с подключенного датчика дифференциального давления

На рис. 16 и 17 представлены блок-диаграмма программы и её лицевая панель с графиком зависимости амплитуды от времени.

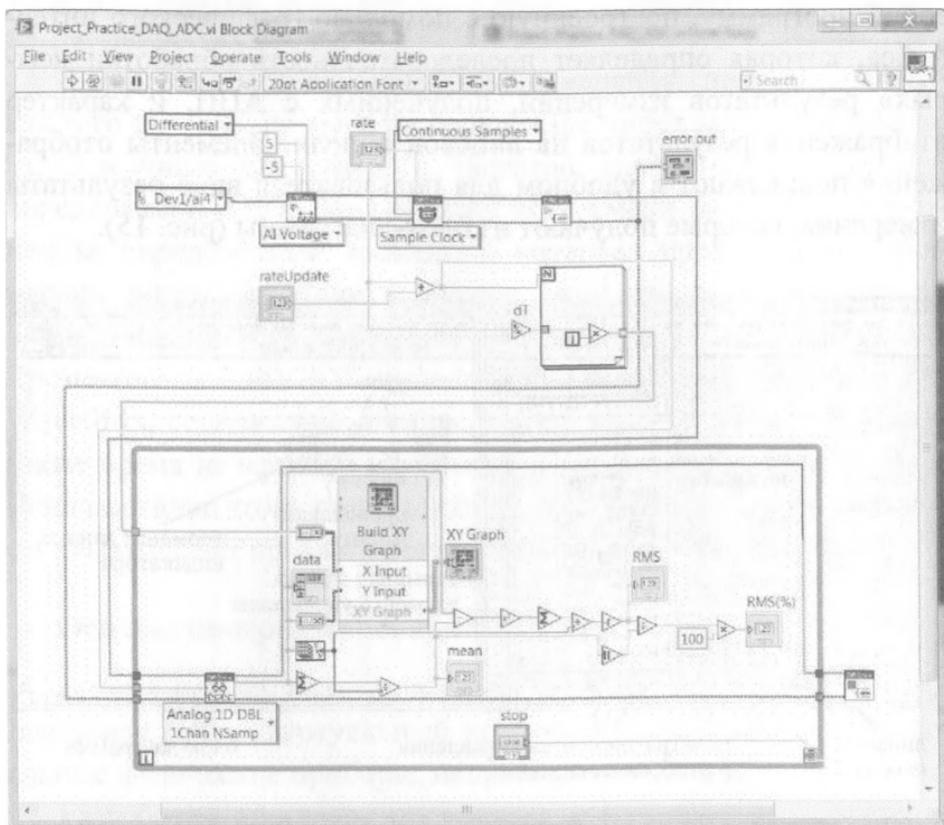


Рис. 16. Блок-диаграмма программы

Блок-диаграмма программы состоит из объектов, некоторые из которых сами могут быть виртуальными приборами. Основные объекты на рис. 16:

- DAQmx Create Virtual Channel – создает виртуальный канал такого типа, который задается в выпадающем меню конфигурирования ВП. В данном случае выбран тип AI Voltage;

- DAQmx Start Task (с зеленой стрелкой) – запускает измерительную задачу;
- DAQmx Read – выполняет операцию чтения, заданного в меню конфигуратора. При выборе настройки Analog⇒SingleChannel⇒Single Sample⇒DBL прибор возвращает одну выборку данных в виде числа двойной точности с плавающей запятой из одного канала аналогового ввода;
- DAQmx Stop Task (с красным квадратом) – останавливает выполнение измерительной задачи.

На блок-диаграмме для физического канала устанавливается значение $Dev\ X/aiN$, где X – номер устройства сбора данных (в данном случае – АЦП), N – номер канала в устройстве.

Частота работы АЦП задаётся параметром *rate*, который подаётся на вход объекта *Sample Clock*. За один такт работы АЦП выдаёт одно значение сигнала, полученного из одного канала.

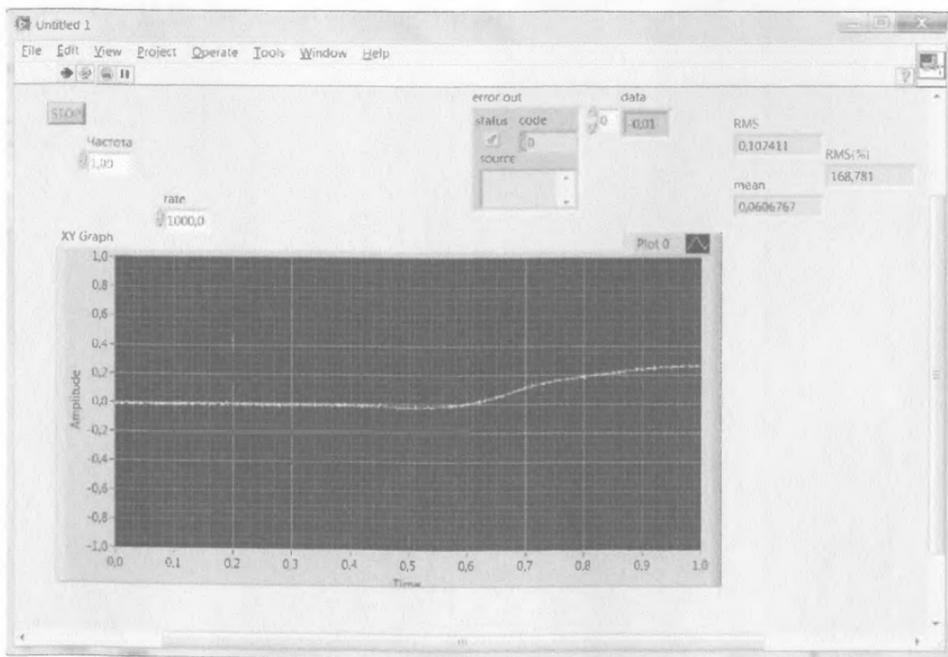


Рис. 17. Простейшая программа с выводом зависимости амплитуды сигнала от времени

Элементы управления и отображения, выводимые на лицевой панели программы (рис. 17):

- **rate (частота)** – задает частоту выдачи сигнала на один канал;
- **mean** – среднее значение сигнала;
- **RMS** – среднеквадратичное отклонение;
- **RMS (%)** – значение среднеквадратичного отклонения в процентах от среднего значения.

Список рекомендуемой литературы

1. Попов, С.Г. Измерение воздушных потоков / С.Г. Попов. – М.: Гостехиздат, 1947.
2. Горлин, С.М. Аэромеханические измерения. Методы и приборы / С.М. Горлин, И.И. Слезингер. – М.: Наука, 1964.
3. Зайдель, А.Н. Погрешности измерений физических величин / А.Н. Зайдель. – Л.: Наука, 1985.
4. Весничева, Г.А. Обработка результатов измерений: Методические указания / Г.А. Весничева, В.Ф. Худяков, З.К. Яковлева, Г.Б. Яцевич. – Санкт-Петербург, 2003.
5. Tavoularis, S. Measurement in fluid mechanics / S. Tavoularis. – Cambridge University Press, 2005.
6. Лупов, С.Ю. LabVIEW в примерах и задачах / С.Ю. Лупов, С.И. Муякшин, В.В. Шарков. – Нижний Новгород, 2007.
7. Михеев, П.М. Учебный курс LabVIEW. Основы I / П.М. Михеев, С.И. Крылова, В.А. Лукьянченко, Д.С. Урюпина. – National Instruments Corporation, 2007.
8. Федосов, И.В. Основы программирования в LabVIEW: Учебное пособие / И.В. Федосов. – Саратов, 2010.

Содержание

Введение	3
1. Измерение силы и момента, действующих на тело	4
2. Измерение давления	6
3. Визуализация течений	10
4. Способы измерения скорости жидкости и газа	14
5. Измерения расхода жидкости и газа	23
6. Сбор и обработка сигналов от датчиков	26
Список рекомендуемой литературы	33

Для заметок

Учебное издание

ИВАНОВ Олег Олегович
ТРИФОНОВ Владимир Викторович
ВЕДЕНЕЕВ Василий Владимирович

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ
В ГИДРОАЭРОДИНАМИКЕ

Учебное пособие

Подготовка оригинал-макета:
Издательство «МАКС Пресс»
Главный редактор: *Е.М. Бугачева*
Компьютерная верстка: *Н.С. Давыдова*
Дизайн обложки: *А.В. Кононова*

Подписано в печать 14.02.2023 г.
Формат 60/90 1/16. Усл.печ.л. 2,25. Тираж 50 экз. Заказ № 014.

Издательство ООО «МАКС Пресс» Лицензия ИД N 00510 от 01.12.99 г.
119992, ГСП-2, Москва, Ленинские горы, МГУ им. М.В. Ломоносова,
2-й учебный корпус, 527 к.
Тел. 8(495)939-3890/91. Тел./Факс 8(495)939-3891.

Отпечатано в полном соответствии с качеством
предоставленных материалов в ООО «Фотоэксперт»
109316, г. Москва, Волгоградский проспект, д. 42,
корп. 5, эт. 1, пом. I, ком. 6.3-23Н

