

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П.КОРОЛЕВА**

**СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ
ИСПЫТАНИЙ ГТД**

Утверждено
редакционно-издательским
советом института
в качестве
методических указаний
к лабораторной работе
для студентов

Самара 2003

УДК 629.7.018.519.6(075.8)

Средства измерений при автоматизации испытаний ГТД:
Метод. указания /Сост. В.А. Григорьев; Самарский государственный аэрокосмический университет, Самара, 2003. 24с.

Методические указания составлены к лабораторной работе, выполняемой при изучении курса «Автоматизированные системы научных исследований». Рассмотрены основные средства измерений, применяемые при автоматизации испытаний и экспериментальных исследований авиационных двигателей. Указан порядок проведения экспериментов по изучению работы датчиков температуры, давления, тяги и расхода топлива.

Составитель: В.А. Григорьев

Рецензент: д.т.н., проф. Новиков Д.К.

1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

1.1. Цель и задачи лабораторной работы

Цель лабораторной работы: ознакомление с различными методами и средствами измерения параметров ГТД, применяемыми при автоматизации их испытаний, приобретение навыков работы с измерительными приборами.

Задачи лабораторной работы:

- 1) изучение устройства и принципа работы датчиков, применяемых при автоматизированных испытаниях ГТД;
- 2) проведение экспериментов по измерению температуры, давления, тяги и расхода топлива.

1.2. Порядок проведения работы

1. Проверка готовности студентов к выполнению лабораторной работы. Для подготовки к лабораторной работе необходимо заранее изучить данное руководство и соответствующие разделы курса лекций и рекомендуемой литературы.

2. Ознакомление с правилами по технике безопасности при работе на экспериментальных установках.

3. Практическое изучение первичных преобразователей и измерительных приборов.

4. Проведение экспериментов по измерению температуры, давления, усилий и расхода.

5. Отчет по лабораторной работе (проводится в виде опроса студентов по материалу лабораторной работы).

2. ОСНОВНЫЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ ИСПЫТАНИЙ ГТД

В процессе испытаний авиационных ГТД измеряется большое количество параметров. Анализ результатов измерений позволяет оценить рабочий процесс двигателя, определить тепловое состояние и напряжение в элементах конструкции, при заводских испытаниях серийных двигателей - определить соответствие двигателя заданным техническим условиям.

При испытаниях ГТД особое место отводится разработке схемы препарирования проточной части двигателя и элементов его конструкции. Она определяет какие сечения двигателя необходимо выбрать для измерения тех или иных параметров, позволяющих оценить работу основных узлов двигателя; количество точек измерения по высоте поперечного сечения проточной части, угловое расположение приемников давлений и датчиков температур; диапазоны измерений; требования по точности оценки параметров. Часто в общую схему препарирования вносятся и так называемые штатные измерения. Это параметры, служащие для оценки двигателя в процессе его эксплуатации на объекте. Естественно, количество штатных параметров значительно меньше, чем экспериментальных, требования по точности ниже, но зато выше показатели надежности.

Автоматизация испытаний позволяет сократить время измерений, повысить их точность, обрабатывать и выдавать результаты эксперимента в темпе проведения испытания, а также оперативно изменять ход испытания. В данной лабораторной работе рассматриваются основные датчики, применяемые в настоящее время в системах автоматизированных испытательных стендов.

2.1. Измерение температур

При испытаниях современных ГТД измеряют температуры: в проточной части; в маслосистеме; в топливной системе; элементов конструкции двигателя.

Диапазон измеряемых температур очень широк: 213...2320 К (-60...2050°C), различные требования к погрешности измерения (от 0,1 до 8 %). Измерения проводятся в различных средах при скоростях движения от $\lambda=0$ до $\lambda=2,3$ и более, температура измеряется как в стационарных, так и в быстропеременных процессах. Вследствие этого при испытании ГТД находят применение разнообразные методы измерения температур.

Наибольшее распространение получили термопары. Принцип их действия основан на возникновении термоЭДС E в цепи, состоящей из разнородных проводников (термоэлектродов). Спай термопары, помещаемый в измеряемую среду, называется рабочим, или горячим спаем. Спай, температуру которого поддерживают постоянной, называют свободным, или холодным спаем. Обычно свободный спай помещают в термостат.

Одна из возможных схем включения термопары в измерительную цепь представлена на рис.2.1.

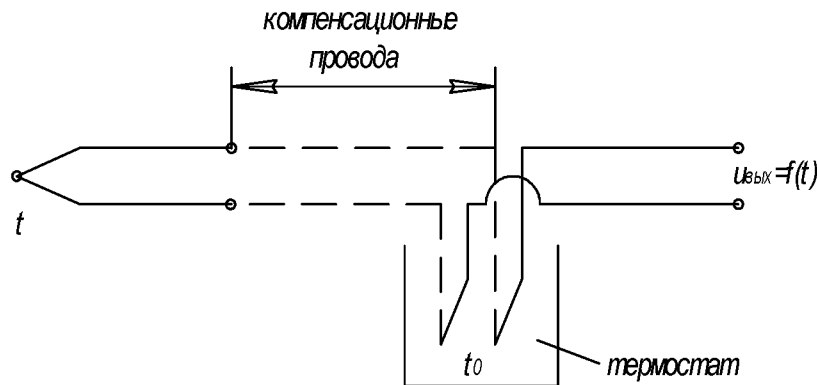


Рис. 2.1. Схема включения термопары в измерительную цепь

Термопары стандартизованы. Они выпускаются промышленностью и имеют нормированные градуировочные характеристики. Обозначения, материал и диапазоны применения промышленных термопар приведены в табл.2.1.

Нормированная градуировочная характеристика хромель-копелевой термопары при условии, что ее свободный спай имеет температуру $t_0=0^\circ\text{C}$, приведена в табл.2.2.

Таблица 2.1 – Некоторые характеристики промышленных термопар

Материал термоэлектродов	Обозначение	Пределы измерений		Типичная погрешность термопары, ±%
		нижний, °C	верхний, °C	
Платинородий-платина	ПП	0	1450	0,5
Хромель-алюмель	ХА	-50	1150	1,0
Хромель-копель	ХК	-50	600	0,6
Никелькобальт-специальюмель	НК-СА	500	900	1,0
Никельжелезо-спецкопель	НЖ-П-СК	-	900	1,0

Таблица 2.2 – Градуировочная характеристика хромель-копелевой термопары ($t_0 = 0^\circ\text{C}$)

$t, ^\circ\text{C}$	0	20	40	60	80	100	120	140	160	600
$E, \text{ мВ}$	0	1,31	2,66	4,05	5,48	6,95	8,43	9,93	11,46	49,02

Если температура свободного спаи $t_0 \neq 0^\circ\text{C}$, но известна (определена, например, с помощью жидкостного термометра), то температуру рабочего спаи с помощью известной нормированной градуировочной характеристики термопары определяют по следующему алгоритму.

По температуре свободного спаи t_0 с помощью градуировочной характеристики определяют термоЭДС E_0 . Полученную величину E_0 складывают с измеренной термоЭДС $E_{\text{изм}}$:

$$E_0 + E_{\text{изм}} = E_{\Sigma}$$

По вычисленной суммарной термоЭДС, с помощью нормированной градуировочной характеристики термопары определяют величину искомой температуры рабочего спая t .

Графическая иллюстрация описанного алгоритма приведена на рис.2.2.

Погрешность определения температуры с помощью термопар по нормированным градуировочным характеристикам составляет $\sim 1\%$.

Конструктивно термопары выполняются в виде так называемых термогребенок, геометрические и прочностные параметры которых определяются размерами проточной части тракта ГТД.

Конструктивно термопары выполняются в виде так называемых термогребенок, геометрические и прочностные параметры которых определяются размерами проточной части тракта ГТД.

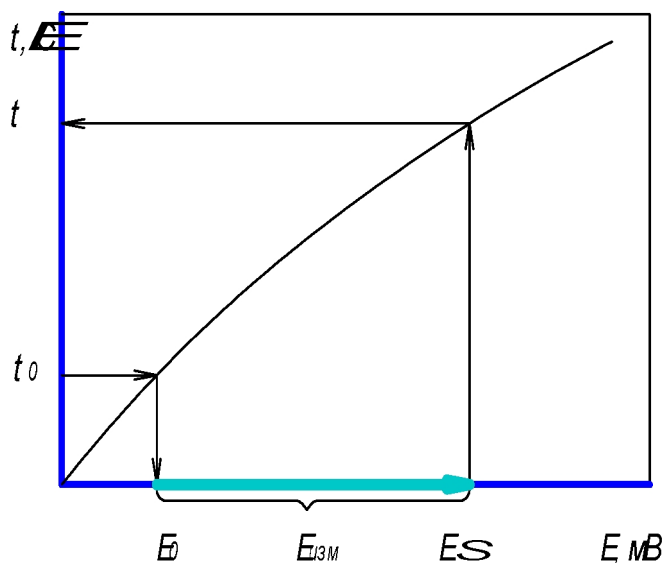


Рис. 2.2. Схема определения температуры при $t_0 \neq 0^\circ\text{C}$

В последнее время при испытаниях ГТД широко используются для измерения температур термометры сопротивления (ТС). Принцип их действия основан на свойстве проводников (полупроводников) изменять свое сопротивление при изменении температуры.

Диапазон работы ТС: платиновых - $260\dots+750^\circ\text{C}$, медных - $-50\dots+180^\circ\text{C}$.

Рабочим органом является чувствительный элемент, выполненный из платиновой или медной проволоки и помещенный в тонкостенный металлический чехол, в который насыпают керамический порошок и затем герметизируют.

Основным преимуществом ТС является их высокая точность. Применение ТС позволяет обеспечить измерения с погрешностью $0,1\dots-0,5\%$,

Недостатки: значительная инерционность, трудность измерения температуры в точке, трудность создания термогребенок из-за сравнительно больших габаритов.

2.2 Измерение давлений

В практике испытаний ГТД измерение давлений встречается наиболее часто. Различают измерения заторможенного (полного) и статического давления. Для того чтобы измерить давления, необходимо поместить в поток соответствующие приемники или производить измерение давления непосредственно на стенке, которую омывает поток. Приемники заторможенного давления с протоком имеют погрешность порядка $0,3\%$.

Применяемые для измерения статического давления специальные зонды имеют обычно погрешность порядка $1,5\%$.

Среди датчиков давления наибольшее распространение при автоматизации испытаний ГТД получили электрические преобразователи индуктивного, потенциометрического, тензорезисторного и частотного типов. Для создания стендовых автоматизированных

измерительных систем в принципе пригодны любые датчики давлений, имеющие электрический выходной сигнал. Однако из достаточно широкого круга датчиков давления по ряду причин применяются в основном потенциометрические, индуктивные и тензометрические.

2.2.1. Потенциометрические датчики давления

Схема потенциометрического датчика приведена на рис.2.3.

В потенциометрических датчиках в качестве чувствительного элемента чаще всего применяется гофрированная мембрана. Под действием измеряемого давления p мембрана 1 деформируется. При этом передвигается шток 2, который поворачивает рычаг 3 с закрепленным на нем подвижным контактом 4, перемещающимся по потенциометру 5.

Каждому значению давления соответствует определенное положение подвижного контакта относительно потенциометра 5 и одно значение выходного относительного напряжения $U_{\text{вых}}$.

Преимущество потенциометрических датчиков: простота согласования с автоматизированной системой измерения, дешевизна, малый вес.

Недостатки: малая виброустойчивость, наличие большого количества механических элементов, низкий частотный диапазон.

Погрешность измерения 0,8...3 %.

Основные типы: МДД, ДДМ, ЭДД, ДТ.

2.2.2. Индуктивные датчики давления

Наиболее распространенный представитель датчиков этого типа-ИКД (измерительный комплекс давления). Это достаточно сложный прибор, состоящий из ряда измерительных и преобразующих элементов.

Прибор ИКД27 включает в себя следующие элементы: упругий чувствительный элемент (ЧЭ); индукционный преобразователь перемещения (ИП); стабилизатор (С); генератор (Г); выпрямитель (В).

Структурная схема прибора ИКД27 представлена на рис.2.4.

Прибор ИКД27 работает следующим образом. Измеряемое давление действует на упругий чувствительный элемент, вызывая его деформацию, которая переводится индукционным преобразователем перемещений в электрический сигнал, пропорциональный измеряемому давлению.

Питание ИП осуществляется от генератора, который преобразует постоянное стабилизированное напряжение $9 \pm 0,5$ В в переменное напряжение с амплитудой 12 В и частотой 28 кГц.

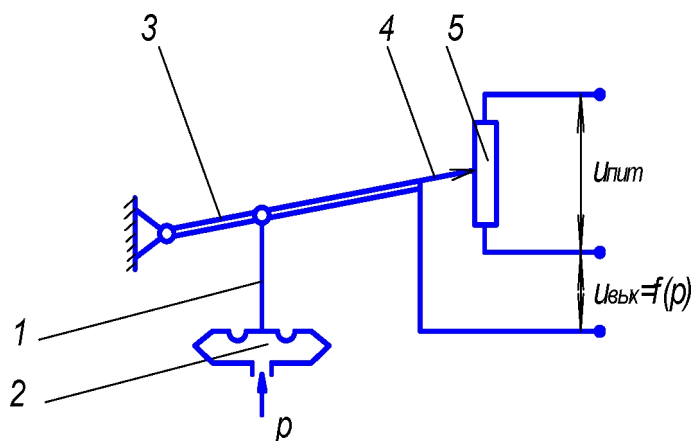


Рис. 2.3. Схема потенциометрического датчика давления

Выходное напряжение ИП после выпрямителя поступает на выходные клеммы прибора в виде напряжения постоянного тока, пропорционального измеряемому давлению. Применяемый в приборе ИКД27 индуктивный элемент является преобразователем дифференциально-трансформаторного типа. Принцип действия его основан на изменении потокосцепления между секциями двух обмоток преобразователя при перемещении якоря, жестко связанного с упругим чувствительным элементом - манометрической коробкой, воспринимающей измеряемое давление.

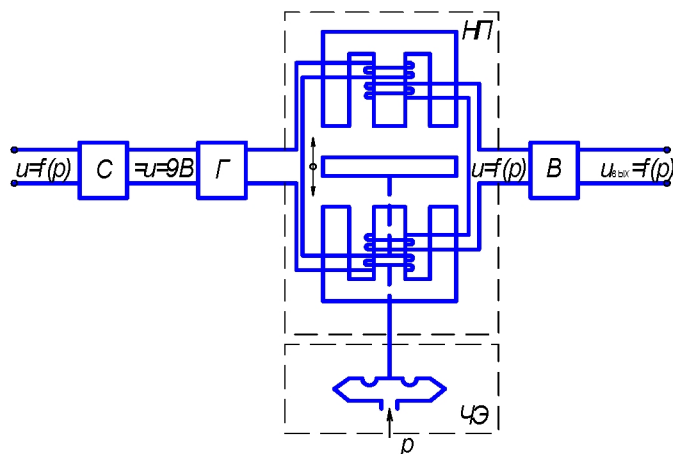


Рис. 2.4. Структурная схема ИКД27

Деформируясь при изменении давления, мембрана перемещает шток с якорем. Перемещение якоря вызывает изменение зазоров между якорем и магнитопроводами, вследствие чего изменяется потокосцепление между секциями первичной и вторичной обмоток, а следовательно, изменяется и напряжение на вторичной обмотке.

Каждому значению измеряемого давления соответствует одно определенное значение выходного напряжения преобразователя. Промышленностью выпускаются приборы ИКД, рассчитанные на широкий диапазон номинальных давлений $p_{ном}$.

Они имеют единую градуировочную характеристику, которая приведена в табл.2.3.

Таблица 2.3 – Единая градуировочная характеристика ИКД

p	0	$0,2 p_{ном}$	$0,4 p_{ном}$	$0,6 p_{ном}$	$0,8 p_{ном}$	$p_{ном}$
$U_{вых}, В$	0,8	2,24	3,68	5,12	6,56	8,0

Погрешность измерения давления с помощью ИКД в случае использования единой градуировочной характеристики составляет $\sim 3\%$.

2.2.3. Тензометрические датчики давления

Способ измерения давлений с помощью тензорезисторов, расположенных на деформируемой измеряемым давлением мембране, позволяет создать довольно простые датчики. Схема такого датчика приведена на рис.2.5. Однако выполненные по такой схеме датчики из-за отсутствия термокомпенсации и низкого качества сцепления тензоэлементов с мембраной не позволяют получить высокие точностные характеристики. Погрешность измерения давления с помощью таких датчиков составляет $1...5\%$, что является их существенным недостатком. От этого недостатка свободны датчики типа Сапфир.

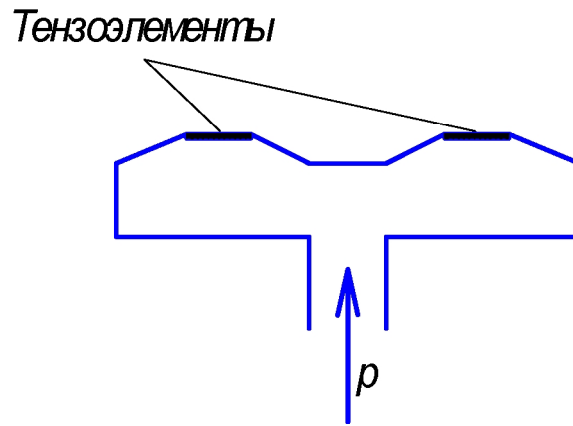


Рис. 2.5. Схема простейшего тензометрического датчика давления

Схема датчика Сапфир-22 приведена на рис.2.6. Датчик устроен следующим образом. Мембранный тензопреобразователь 3 размещен внутри основания 9. Внутренняя полость 4 тензопреобразователя заполнена кремнийорганической жидкостью и отделена от измеряемой среды металлической гофрированной мембраной 6, приваренной по наружному контуру к основанию 9. Полость 10 сообщена с окружающей средой. Измеряемое давление подается в камеру 7 фланца 5, который уплотнен прокладкой 8.

Измеряемое давление воздействует на мембрану 6 и через жидкость на мембрану 3 тензопреобразователя, вызывая ее прогиб и изменение сопротивления тензорезисторов. Электрический сигнал от тензопреобразователя передается в электронное устройство 1 по проводам через термовывод 2. Датчики Сапфир-22, предназначенные для измерения абсолютного, избыточного давления и перепада давлений, имеют унифицированное электронное устройство 1 и отличаются конструкцией измерительного блока.

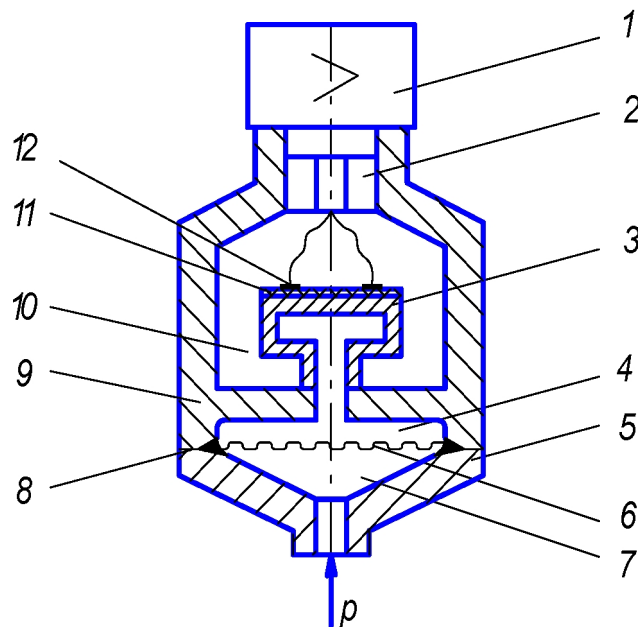


Рис. 2.6. Схема датчика давления Сапфир-22

Чувствительным элементом тензопреобразователя является пластина 11, из монокристаллического сапфира с кремниевыми пленочными тензорезисторами 12, прочно соединенная с металлической мембраной тензопреобразователя. Датчики типа Сапфир обеспечивают измерения давления с погрешностью 0,2 %.

2.3. Измерение сил

Измерение сил в процессе испытания ВРД необходимо для определения величины тяги, крутящего момента, расхода топлива массовым способом и т.п. Для этих целей находят широкое применение упругие силоизмерители с электрическими первичными преобразователями. Наибольшее распространение для измерения силы тяги в последние года получили и тензорезисторные датчики типа ТВС. Схема датчика типа ТВС приведена на рис.2.7. Работа этого датчика основана на преобразовании деформации упругого элемента в электрический сигнал, пропорциональный измеряемой нагрузке. Тензорезисторы собираются по схеме электрического моста. Упругий элемент 1 силоизмерителя опирается на подставку 3, выполненную в виде цилиндрической призмы. Деформация изгиба при приложении нагрузки передается тензорезисторам 5, вызывая растяжение нижних и сжатие верхних тензорезисторов, что изменяет их электрическое сопротивление. Тензорезисторы включены в мостовую схему. Все четыре плеча моста активны. Это увеличивает чувствительность датчика и позволяет получить линейное уравнение связи усилия с выходным электрическим сигналом в виде напряжения постоянного тока.

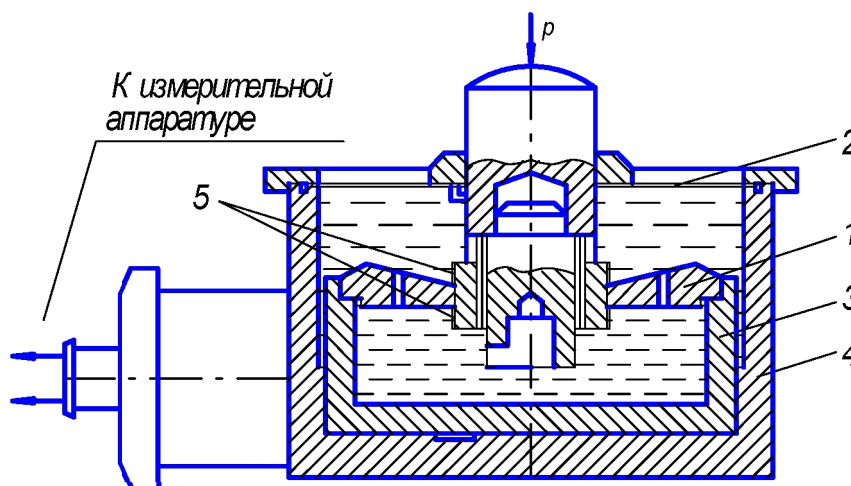


Рис. 2.7. Схема датчика тяги ТВС

С целью защиты тензорезисторов от влаги и газов чувствительный элемент силоизмерителя заключен в герметичный корпус 4, который заполняется кремнийорганической жидкостью для защиты тензорезисторов от влаги и для смазки опорных поверхностей. Герметизация полости осуществляется посредством мембраны 2.

Датчики типа ТВС выпускаются на разные диапазоны измерения силы. Максимальная величина измеряемого усилия 320 кН (32 тс). Номинальное выходное напряжение датчика 50 мВ.

В электрической схеме датчика ТВС предусмотрена термокомпенсация изменения электрического сопротивления тензорезисторов под действием температуры окружающего воздуха.

Датчик типа ТВС позволяют измерять тягу двигателя с погрешностью не более 0,3 %.

2.4. Измерение частоты вращения

Наибольшее распространение имеют два типа датчиков частот вращения роторов ГТД. Это датчики типа ДТЭ и типа ДЧВ.

Датчики типа ДТЭ представляют собой обычный низкочастотный (максимальная выходная частота 100 Гц) тахогенератор трехфазного тока, вал которого через редуктор связан с ротором двигателя. Частота тока и выходное напряжение тахогенератора пропорциональны измеряемой частоте вращения.

Схема датчика ДЧВ представлена на рис.2.8. Это датчик индукционного типа, представляющий собой магнит с обмоткой, импульсы в которой возникают при вращении специального возбуждителя, установленного на роторе двигателя.

Выходная частота датчика ДЧВ (2000...3000 Гц) значительно выше, чем у ДТЭ, но амплитуда выходного сигнала меньше. Частота электрического тока f на выходе из датчика пропорциональна измеряемой частоте вращения ротора n . Датчик ДЧВ позволяет измерять частоту вращения с погрешностью 0,2 %.

2.5. Измерение расхода жидкости и газа

В настоящее время практически на всех испытательных стендах в качестве средств измерения объемного расхода топлива, масла, гидросмеси широко применяются датчики расхода турбинного типа ТДР.

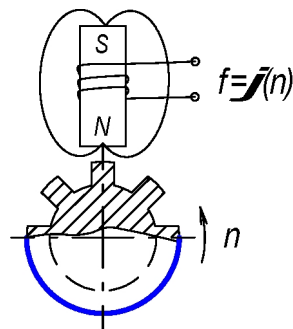


Рис. 2.8. Схема датчика частоты вращения ДЧВ

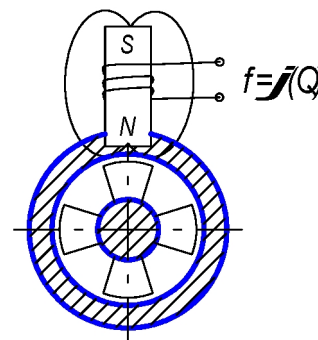


Рис. 2.9. Схема датчика расхода жидкости ТДР

Схема датчика расхода жидкости типа ТДР представлена на рис.2.9. Принцип работы датчика ТДР сходен с работой датчика ДЧВ. Только в ТДР генерация частотных импульсов электрического тока происходит при пересечении магнитных силовых линий лопостями турбины, установленной в потоке жидкости. Частота вращения турбинки и, следовательно, частота электрических импульсов пропорциональны объёмному расходу Q жидкости, проходящей через датчик.

Градуировочная характеристика датчика имеет вид:

$$Q = a + b f.$$

Величины коэффициентов a и b указываются в паспорте датчика.

При правильной организации измерительных участков (постановка струевыпрямителей, выполнение на входе в датчики прямых участков) и индивидуальной градуировке на рабочей жидкости ТДР уверенно обеспечивает измерения с погрешностью не более 0,5 %. Массовый расход жидкости определяют по формуле:

$$G = Q \rho,$$

где ρ - плотность жидкости.

Величина плотности керосина определяется по формуле:

$$\rho = \rho_0 [1 - 0.0078(t_m - 20)],$$

где ρ_0 - плотность керосина при $t_m = 20^\circ\text{C}$;

t_m - температура керосина,

или с помощью прибора, называемого денсиметром.

В автоматизированных системах для измерения расхода топлива используют также объемные расходомеры - штихпроберы с автоматической регистрацией времени опорожнения контрольного объема с помощью фотоэлектрических регистраторов. Схема штихпробера приведена на рис.2.10.

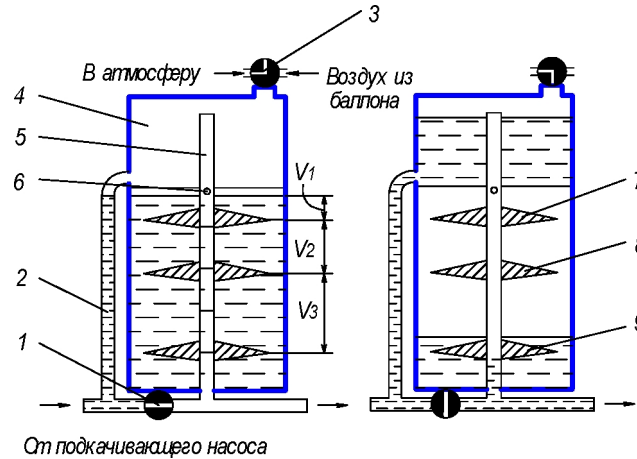


Рис. 2.10. Схема штихпробера

До начала измерения топливо под давлением подкачивающего насоса проходит через открытый кран 1 в двигатель. Одновременно оно заполняет трубопровод 2 и мерные объемы V_2 и V_3 до уровня, который может регулироваться давлением сжатого воздуха при помощи крана 3. Включение штихпробера в измерительный цикл происходит поворотом крана 1. При этом топливо от насоса через трубопровод 2 начинает заполнять компенсационный объем 4. Воздух из этого объема через трубку 5 и отверстие 6 переходит в резервный объем и начинает вытеснять топливо в трубопровод, подводящий топливо к двигателю. Мерные диски 7,8,9 образуют местные сужения проходного сечения и снижающийся уровень топлива опускается в этих местах значительно быстрее, что повышает точность фиксирования момента времени. Автоматизированное фиксирование моментов прохождения уровня топлива мимо мерных дисков осуществляется с помощью разнообразных датчиков уровня. В качестве примера на рис. 2.11. показана оптическая система с фотодиодом.

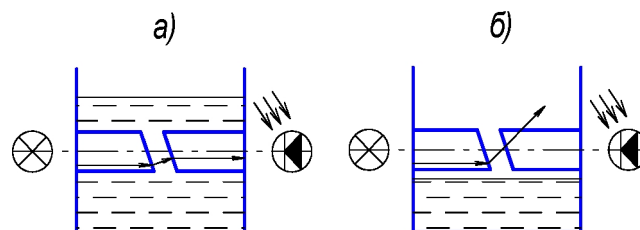


Рис.2.11. Оптическая система на основе фотодиода для фиксирования момента прохождения уровня топлива: а) топливо омывает призмы; б) топливо ниже оптических призм.

Пока топливо омывает оптические призмы, свет от лампочки проходит через призмы, используя соответствующие углы преломления сред (стекло-керосин-стекло), до фотодиода, когда уровень топлива опускается ниже среды (стекло-воздух-стекло), меняет углы преломления и свет перестает поступать на фотодиод. Открытие или закрытие фотодиода используется для включения таймера. Таким образом принцип действия штихпробера основан на измерении времени расходования двигателем заранее известного объема топлива. Расход определяется по формуле

$$G_m = \frac{V_{шт} \rho}{\tau},$$

где $V_{шт}$ - мерный объем штихпробера (на рис.2.10 это объемы V_1, V_2);
 τ - время расходования мерного объема.

Мерный объем должен быть достаточно большим, так чтобы время измерения было не меньше 30 с.

Недостаток: невозможность измерения мгновенных расходов. Погрешность измерения расхода топлива штихпробером составляет 0,35-0,75%.

Для измерения расхода воздуха через двигатель на входе в него устанавливается насадок, имеющий лемнискатный профиль. Схема такого насадка, называемого лемнискатным, приведена на рис.2.12.

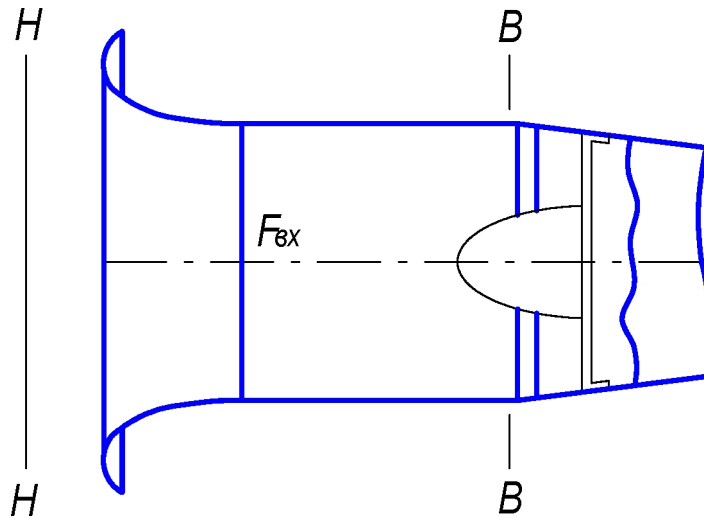


Рис. 2.12. Схема лемнискатного насадка, установленного на входе в двигатель

Лемнискатный профиль (его уравнение в полярных координатах имеет вид $r^2 = a^2 \cdot \cos 2\alpha$) обеспечивает безотрывное втекание воздуха, чем достигается равномерное поле скоростей потока на входе в двигатель с незначительными потерями давления:

$$\Delta p_v = p_n - p_v^*.$$

Расход воздуха определяют по уравнению

$$G_v = m q(\lambda_v) p_v^* F_{вх} / \sqrt{T_v^*},$$

где m - постоянная величина;

$p_v^* = p_n^*$ - полное давление;

$F_{вх}$ - площадь сечения;

T_v^* - полная температура;

$q(\lambda_v)$ - газодинамическая функция приведенного расхода.

Эта функция определяется исходя из измеряемой величины

$$\pi(\lambda_v) = p_v / p_v^* = 1 - \Delta p_v / p_n \quad (\text{здесь } \Delta p_v = p_n - p_v^*)$$

по таблицам газодинамических функций.

Погрешность измерения расхода составляет около 1%.

3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В лабораторной работе проводятся следующие эксперименты: измерение температуры с помощью термопар; измерение давления с помощью ИКД; измерение расхода жидкости с помощью ТРД и штихпробера; градуировка силоизмерительного устройства с датчиком ТВС.

3.1. Измерение температуры с помощью термопар

Экспериментальная установка состоит из термостата с нагревательным элементом, внутри которого установлена хромель-копелевая термопара, соединенная с цифровым милливольтметром. По показаниям цифрового милливольтметра с помощью градуировочной характеристики; хромель-копелевой термопары, приведенной в табл.2.2., определяется несколько значений температуры воздуха внутри термостата при нагреве и охлаждении нагревательного элемента.

При этом необходимо учитывать, что холодный спай термопары, образованный в месте соединения компенсационных проводов с медными проводами измерительного прибора, находится в помещении и имеет температуру окружающего воздуха, т.е. $t_0 = t_n$. Результаты измерений и их обработка помещаются в протокол в виде табл. 3.1.

Таблица 3.1 – Измерение температуры

Номер режима	$E_{\text{изм}}$, мВ	t_0 , °C	E_0 , мВ	E , мВ	t , °C

Обработка результатов измерений осуществляется в следующей последовательности по данным табл.2.2 строится график градуировочной характеристики хромель-копелевой термопары. Образец оформления графика градуировочной характеристики приведен на рис.3.1 По измеренной температуре холодного спае термопары $t_0 = t_n$ с помощью графика градуировочной характеристики определяется термоЭДС E_0 . При измерении температуры по цифровому милливольтметру определяется величина термоЭДС $E_{\text{изм}}$. Затем вычисляется значение

$$E = E_0 + E_{\text{изм}}$$

По величине $E_{\text{изм}}$ с помощью графика градуировочной характеристики определяется величина измеренной температуры t .

Ф.И.О. _____ группа № _____ дата _____

Градуировочная характеристика
хромель-копелевой термопары

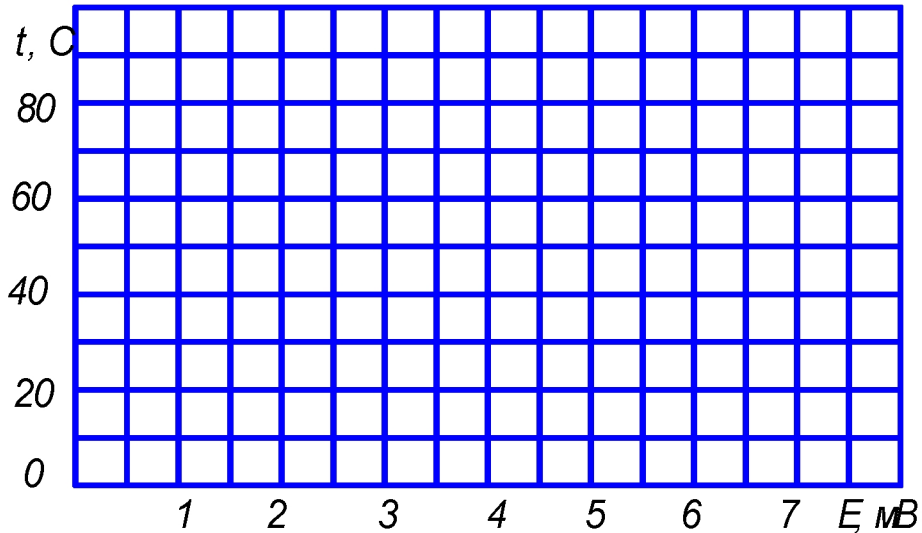


Рис.3.1. Образец оформления градуировочной характеристики хромель-копелевой термопары.

3.2. Измерение давления с помощью ИКД 27

На вход в три одинаковых ИКД 27 с пульта управления подают сжатый воздух. Редуктором устанавливают несколько значений давления, которые контролируются по образцовому манометру. С помощью цифрового вольтметра снимают показания каждого ИКД 27. Затем по единой градуировочной характеристике, приведенной в данных методических указаниях, определяют величину измеряемого давления. Значение номинального давления ИКД указано на их корпусе. После этого вычисляют случайную и систематическую погрешности измерений.

Результаты измерений и их обработки помещаются в протокол в виде табл.3.2. Обработка результатов измерений осуществляется в следующей последовательности. По величине номинального давления $p_{ном}$, указанного на корпусе ИКД 27, с помощью единой градуировочной характеристики, представленной в табл.2.3, рассчитывают и строят на графике размерную градуировочную характеристику применяемых ИКД 27. Образец оформления градуировочной характеристики представлен на рис.3.2. На корпусе ИКД 27 величина номинального давления указывается в кГ/см^2 .

Таблица 3.2. – Измерение давлений

Номер режима	$p_{обр, дел.}$	$U_1, В$	$U_2, В$	$U_3, В$	$p_{обр, кПа.}$	$p_1, кПа.$	$p_2, кПа.$	$p_3, кПа.$	$p, кПа.$	$\delta_{сист, \%}$	$S, кПа.$	$\delta_{случ, \%}$

С помощью построенной градуировочной характеристики по величинам напряжения на выходе из датчиков ИКД 27 определяются значения измеряемого давления. Для каждого

режима по показаниям датчиков ИКД 27 делается оценка измеряемого давления. В качестве этой оценки принимается среднее арифметическое из показаний трех датчиков ИКД 27:

$$\bar{p} = \frac{\sum_{i=1}^n p_i}{n}$$

где n - количество измерений на данном режиме ($n=3$).



Рис.3.2. Образец оформления градуировочной характеристики датчика ИКД 27

Вычисляется оценка средней квадратической погрешности измерения

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2}{n-1}} \quad \text{и}$$

случайная погрешность измерения давления - $\Delta_{\text{случ}} = \pm t_p \cdot S$, где t_p - квантиль распределения Стьюдента, определяемая в зависимости от числа степеней свободы $f=n-1$ и принятой доверительной вероятности P . При $n=3$ и $P=0,9$ значение $t_p = 2,92$; относительная случайная погрешность измерения давления

$$\delta_{\text{случ}} = \frac{\Delta_{\text{случ}}}{P} \cdot 100\% .$$

Затем определяется оценка систематической погрешности измерения давления

$$\Delta_{\text{сист}} = \bar{p} - p_{\text{ист}} ,$$

где $p_{\text{ист}}$ - истинная величина давления.

Здесь в качестве величины истинного давления можно принять показание образцового манометра $p_{\text{обр}}$, так как его погрешность в несколько раз меньше, чем погрешность ИКД 27:

$$p_{\text{ист}} = p_{\text{обр}} \text{ кПа} = \frac{98,1 \cdot 2,5}{100} \cdot p_{\text{обр}} \text{ дел},$$

Относительная систематическая погрешность измерения давления

$$\delta_{\text{сист}} = \frac{\Delta_{\text{сист}}}{P_{\text{обр}}} \cdot 100\% .$$

3.3. Измерение расхода жидкости с помощью ТДР и штихпробера

Датчик расхода ТДР подключается к водяной магистрали. Вращая вентиль, частотомера. По градуировочной характеристике датчика, приведенной в его изменяют расход воды через ТДР. При этом фиксируют частоту электрических импульсов, подаваемых датчиком, с помощью цифрового паспорта, определяют объемный расход воды.

Штихпробер заполняется керосином, который затем сливают в мерную емкость. С помощью электрического или ручного секундомера определяется время расходования мерного объема. Измерив плотность керосина денсиметром и зная величину мерного объема штихпробера, определяют средний массовый расход керосина.

Результаты измерений и их обработки помещаются в протокол в виде табл.3.3. Обработка результатов измерений производится в следующей последовательности.

Таблица 3.3 – Измерение расхода жидкости

Номер режима	ТДР				штихпробер			
	f , Гц	Q , л/с	ρ , кг/м ³	G , кг/с	τ , с	$V_{шт}$, м ³	ρ , кг/м ³	G , кг/с

Для датчика расхода ТДР

По измеренной частоте электрических импульсов f с помощью градуировочной характеристики определяется объемный расход жидкости Q :

$$Q = \alpha + \epsilon f,$$

где $\alpha = 0,4421 \cdot 10^{-3}$, $\epsilon = 0,7928 \cdot 10^{-3}$ - коэффициенты градуировочной характеристики датчика ТДР (величины коэффициентов « α » и « ϵ » даны в паспорте датчика).

Косвенным измерением определяется плотность жидкости

$$\rho = \rho_0 [1 - 0,0078(t - 20)], \text{ кг/м}^3$$

где ρ_0 - плотность жидкости при температуре 20°C;

t - температура жидкости в °C.

Вычисляется массовый расход жидкости - $G = \rho Q$.

Для штихпробера

Массовый расход жидкости

$$G = \frac{V_{шт} \rho}{\tau},$$

где $V_{шт}$ - величина мерного объема штихпробера;

τ - время расходования мерного объема;

ρ - плотность керосина.

3.4. Градуировка силоизмерительного устройства с датчиком тяги ТВС

При градуировке силоизмерительного устройства его подвижная платформа нагружается заданным усилием P , которое последовательно изменяется в сторону увеличения (прямой ход) и затем в сторону уменьшения (обратный ход). При этом всякий раз с помощью цифрового милливольтметра фиксируется напряжение на выходе из ТВС.

На учебном стенде для испытаний ТРДД АИ-25 заданные усилия создаются путем последовательного навешивания и затем снятия с градуировочного устройства семи грузов массой по 25 кг. Сила веса этих грузов, увеличенная в десять раз с помощью специальной рычажной системы, передается на подвижную платформу силоизмерительного устройства, имитируя тягу двигателя. Последовательное подвешивание и снятие грузов осуществляется с помощью специальной автоматизированной системы.

По полученным экспериментальным точкам строится график зависимости $P=f(U_{\text{вых}})$, который в дальнейшем можно использовать для расшифровки показаний датчика тяги ТВС при испытании двигателя.

Результаты наблюдений и их обработки для получения градуировочной зависимости помещаются в протокол в виде табл.3.4. Образец оформления графика градуировочной характеристики силоизмерительного устройства приведен на рис.3.3.

Таблица 3.4 – Градуировка силоизмерительного устройства с датчиком ТВС

Номер режима	P , кг	$U_{\text{пр х}}$, мВ	$U_{\text{обр х}}$, мВ	$U_{\text{ср}}$, мВ	P , кН

ФИО _____ группа № _____ дата _____

Градуировочная характеристика силоизмерительного станка с датчиком ТВС

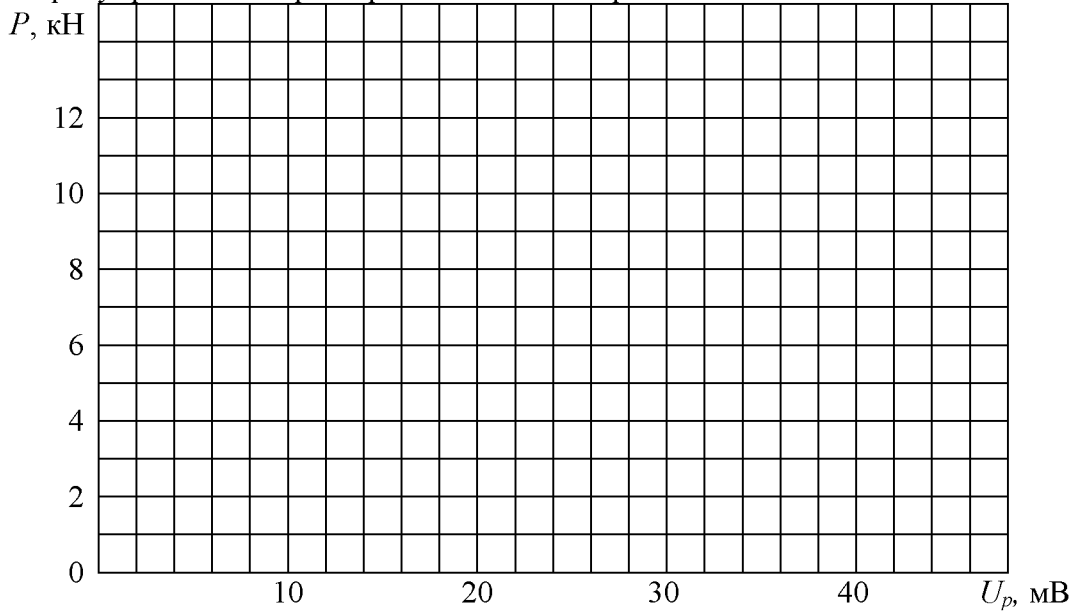


Рис.3.3. Образец оформления градуировочной зависимости $P_{\text{дв}}=f(U_p)$

В протоколе лабораторной работы кратко описывается содержание проводимых экспериментов, зарисовываются схемы используемых в экспериментах датчиков, записываются расчетные формулы. Оформленный протокол и построенные графики градуировочных характеристик предъявляется преподавателю.

Библиографический список

1. КОМПАНЕЦ В.К., СКОБЕЛЕВ О.Д. Технические средства АСНИ ГТД на базе КАМАК и микроЭВМ, Куйбышев: КуАИ, 1983. – 90с.
2. СОЛОХИН Э.Л. Испытания авиационных воздушно-реактивных двигателей. М.:Машиностроение, 1975. – 356с.
3. Электрические измерения неэлектрических величин. 5-е изд./Под изд. П.В.Новицкого. Л.: Энергия, 1975. – 576с.
4. Испытания воздушно-реактивных двигателей/ Под ред. А.Я.ЧЕРКЕЗА. – М.:Машиностроение, 1992. – 304с.
5. КРАМАРУХИН Ю.Е. Приборы для измерения температуры. – М.: Машиностроение, 1990. – 208с.

Составитель: Владимир Алексеевич Григорьев

СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ ИСПЫТАНИЙ ГТД

Редактор
Техн.редактор
Корректор

Подписано в печать г. Формат 60x64 1/16. Бумага оберточная белая. Печать оперативная. Усл.п.л.
Уч.-изд.л. Т. экз. Заказ №

САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ имени акад.
С.П.Королева
443086, Самара, Московское шоссе, 34.
ИПО Самарского государственного аэрокосмического университета
443001, Самара, Молодогвардейская, 151.