

Министерство науки, высшего образования
и технической политики РСФСР

Самарский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт имени академика С.П.Королева

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК
ТУРБИНЫХ РАСХОДОМЕРОВ ТОПЛИВНЫХ СИСТЕМ
СИЛОВЫХ УСТАНОВОК ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Методические указания
к лабораторной работе

Самара 1992

Составитель И.П.К а н у н и к о в

УДК 629.7.063.6

Исследование характеристик турбинных расходомеров топливных систем силовых установок летательных аппаратов: Метод. указания /Самар. авиац. ин-т; Сост. И.П.К а н у н и к о в. Самара, 1992. 32 с.

Изложены методы измерения и рассмотрены принципы действия преобразователей расхода топлива в авиационных силовых установках. Подробно проанализированы принципы работы и устройство авиационных тахометрических расходомеров. Приведена методика тарировки и определения характеристик первичных преобразователей мгновенного и суммарного расходов.

Методические указания предназначены для студентов специальности 13.03 при изучении курсов "Авиационные силовые установки", "Спецоборудование компрессорных станций", "Автоматизация технической эксплуатации летательных аппаратов и ППА". Выполнены на кафедре эксплуатации летательных аппаратов и двигателей.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Самарского ордена Трудового Красного Знамени авиационного института имени академика С.П.Королева

Рецензент В.И.К о с т и н

Ц е л ь р а б о т ы - ознакомление с методикой проверки основных метрологических характеристик турбинных преобразователей расхода жидких сред, применяемых в топливных системах авиационных силовых установок.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с методами и устройствами измерения расхода жидких и газообразных веществ.
2. Изучить принцип работы и конструкцию турбинных тахометрических расходомеров.
3. Изучить нормируемые метрологические характеристики турбинных расходомеров и методику их определения.
4. Освоить метод интерполяции экспериментальных данных - метод "наименьших квадратов" - с применением ЭВМ "Электроника ДЗ-28".
5. Изучить конструкцию и правила работы на экспериментальной установке.
6. Выполнить экспериментальные работы по определению метрологических характеристик турбинного датчика расхода.
7. Обработать результаты измерений.
8. Оформить отчет.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ

Общие сведения

Качественное изменение основных характеристик современных летательных аппаратов — скорости и высоты полета, дальности, грузоподъемности, мощности силовых установок — создали предпосылки значительного повышения требований к бортовым измерительным устройствам и, в частности, системам измерения запаса, расхода и управления расходом топлива. Это объясняется, во-первых, тем, что топливо является на летательном аппарате самой большой и переменной в полете массой (запасы топлива составляют 40–50% массы конструкции летательного аппарата, а полезный — коммерческий — груз в зависимости от дальности полета и вариантов загрузки — 20–50% массы заправляемого топлива), поэтому вопросы устойчивости летательного аппарата могут быть решены только при условии правильной продольной и поперечной перекачки топлива.

Во-вторых, величина мгновенного расхода, количество выработанного и оставшегося топлива является важными контролируемыми параметрами при диагностике состояния силовой установки в условиях полета, а также для оценки и прогнозирования состояния ответственных деталей, узлов и систем с целью обеспечения необходимыми данными служб технической эксплуатации. Реализация этих функций позволяет предотвратить вторичные разрушения в двигателе, повысить эксплуатационную надежность и безопасность полетов, сократить трудозатраты на техническую эксплуатацию и расход запасных частей, а также время простоев самолетов, реализовать метод технического обслуживания авиационной техники по "фактическому состоянию". Отмеченное обуславливает высокие требования к совершенству систем контроля запаса и расхода топлива, повышению точности и достоверности определения истинного количества топлива на различных этапах полета.

Первичные преобразователи в системах контроля являются особенно важным звеном, которое в достаточной мере определяет качество всей системы. В связи с этим к ним предъявляют особые требования точности, надежности, стабильности работы, способности работать в жестких условиях окружающей среды. Точное измерение расхода различных веществ необходимо и при проведении научно-исследовательских работ, управления технологическими процессами во многих от-

расходах народного хозяйства, учете и контроле расходуемых жидких и газообразных материалов. С помощью преобразователей расхода осуществляется контроль и поддержание оптимальных режимов не только авиационных двигателей, но и других транспортных и стационарных судовых установок. Годовой эффект от их применения в масштабах всей страны составляет сотни миллионов рублей.

Методы измерения и преобразователи расхода

В соответствии с ГОСТ 15528-70 расходомером называется прибор для измерения расхода вещества, а устройство, непосредственно воспринимающее расход и преобразующее его в удобную для измерения величину, обозначается термином преобразователь расхода.

Разнообразие, сложность, а зачастую и противоречивость предъявляемых современной наукой и техникой требований к создаваемым расходомерам: высокие точность измерений и надежность приборов, независимость результатов измерений от изменения параметров среды (например плотности), хорошие динамические характеристики (малая постоянная времени и высокая частота свободных колебаний), возможно более широкий диапазон измеряемых расходов - привели к появлению большого числа разнообразных методов измерения расходов.

В общем случае объемный расход Q и массовый расход G определяются в следующем виде:

$$Q = \int_S v ds, \quad G = \int_S \rho v ds, \quad (1)$$

где v и ρ - соответственно местные скорость и плотность потока в сечении S .

При равномерном установившемся движении потока в цилиндрическом трубопроводе с площадью поперечного сечения S и средней скорости в сечении v_{cp} объемный и массовый расход определяются как

$$Q = v_{cp} S, \quad G = \rho v_{cp} S = \rho Q. \quad (2)$$

При фиксированной площади сечения объемный расход будет функцией только средней скорости потока:

$$Q = f(v_{\text{ср}}). \quad (3)$$

Это послужило толчком к появлению большого числа расходомеров, имеющих первичные преобразователи расхода с различными принципами действия, но с общей рабочей характеристикой вида

$$y_1 = f(v_{\text{ср}}), \quad (4)$$

где y_1 - выходной сигнал преобразователя.

В других расходомерах, наоборот, за счет поддержания постоянной скорости варьируемой величиной является площадь поперечного сечения, и их общая характеристика имеет вид

$$y_2 = f(S). \quad (5)$$

В авиационных топливных и гидравлических системах наибольшее применение получили расходомеры, использующие различные методы измерения скорости потока. К таким методам измерения расхода жидких и газообразных веществ относятся:

метод переменного перепада давлений, основанный на измерении скорости жидкости (газа) в дросселированном (сжатом) сечении потока;

тахометрические, основанные на зависимости частоты вращения тела, установленного в трубопроводе, от расхода (скорости) вещества;

тепловой, в котором теплота, теряемая нагретым телом, зависит от скорости потока жидкости (газа);

ультразвуковой, основанный на зависимости скорости звука в движущейся среде от скорости движения потока;

электромагнитный, основанный на наведении в электропроводной жидкости ЭДС при течении жидкости по трубе, пересекаемой магнитным полем;

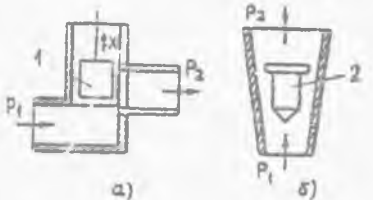
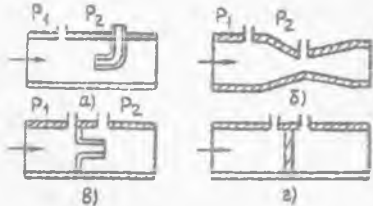
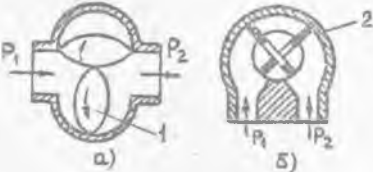
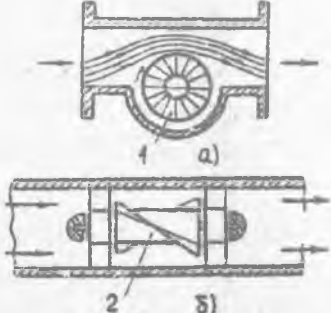
и целый ряд других методов.

Ко второй группе относится метод постоянного перепада давлений, при котором происходит уравновешивание массы подвижных частей расходомера гидравлическим давлением со стороны потока.

В табл. I приведены схемы расходомеров, реализующие перечисленные выше методы измерения расхода.

Наряду с рассмотренными в табл. I методами измерения расхода жидкостей и газов известны и применяются в той или иной мере

Таблица I

№ схемы	Принципиальная схема	Обозначения
I		<p>Преобразователи расхода постоянного перепада: а - поршневой, 1 - поршень; б - ротаметрический, 2 - ротор-поплавок</p>
2		<p>Преобразователи расхода переменного перепада: а - с напорной трубкой; б - с трубкой Вентури; в - с соплом; г - с диафрагмой</p>
3		<p>Тахометрические камерные (объемные) преобразователи расхода: а - шестеренчатый, 1 - овалы- ные шестерни; б - лопастной, 2 - выдвижные лопасти</p>
4		<p>Тахометрические турбинные преобразователи расхода: а - с тангенциальной турбиной; б - с осевой турбиной; 1, 2 - турбинка</p>

№ схем	Принципиальная схема	Обозначения
5		<p>Преобразователь расхода тахометрического парикового расходомера с винтовым направляющим аппаратом: 1 - винтовой направляющий аппарат; 2 - индукционное устройство; 3 - опорное кольцо; 4 - неподвижные лопасти; 5 - шарик</p>
6		<p>Тепловой преобразователь расхода: а - с термоспротивлением; б - с термопарой; 1 - термоспротивление, 2 - термопара</p>
7		<p>Ультразвуковой фазовый расходомер: Г - генератор, 1, 2 - усилители, 3 - фазометр</p>
8		<p>Электромагнитный расходомер: Г - электромагнит, 2 - трубопровод, 3 - электроды, Ук - гальванометр</p>

другие: вихревые, оптические, ядерно-магнитные, ионизационные, концентрационные, меточные, парциальные, корреляционные, поляризационные и т.д. В системах измерения расхода топлива они не получили должного распространения.

Ввиду того, что потребление топлива двигателя и его экономичность определяются массовым расходом, при измерении расходомером объемного расхода необходимо производить одновременное измерение величины плотности потока. Затем во вторичной схеме произвести умножение показаний объемного расходомера и плотнoмера, чтобы выходящая величина прибора соответствовала массовому расходу. Это является недостатком расходомеров, в частности турбинных, измеряющих объемный расход.

Принцип работы и устройство авиационных тахометрических расходомеров с аксиальной турбинкой

Как отмечалось в предыдущем разделе, принцип работы тахометрического турбинного расходомера основан на зависимости между объемным расходом жидкости и угловой скоростью вращения турбинки, помещенной в ее поток. Для ненагруженной турбинки эта скорость будет пропорциональна средней скорости потока, а значит и расходу.

В общем случае частота вращения аксиальной турбинки f зависит от многих величин:

$$f = F(Q, \nu, M_c, D, d_H, d_B, Z, L, H), \quad (6)$$

где Q - объемный расход жидкости, имеющий вязкость ν и плотность ρ ;

M_c - момент сопротивления от трения в опорах турбинки и реакции тахометрического преобразователя;

D - диаметр трубопровода;

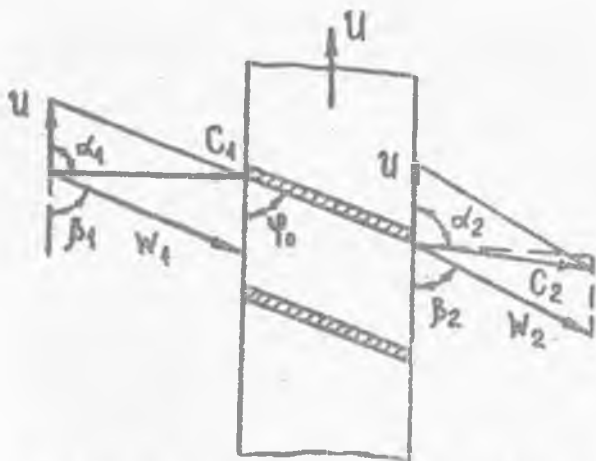
d_H и d_B - наружный и внутренний диаметры лопастей турбинки;

Z - число лопастей турбинки;

L - осевая длина лопастей;

H - шаг винтовой линии, по которой выполнены лопасти турбинки.

На рис. 1 изображена схема скоростей на входе и выходе аксиальной турбинки, на ней приняты следующие обозначения: C_1 и C_2 — абсолютные скорости жидкости на входе и выходе; W_1 и W_2 — относительные скорости; α_1 и α_2 — углы между абсолютными и окружными u скоростями на входе и выходе.



Р и с. 1. Схема скоростей на входе и выходе аксиальной турбинки

Если бы турбинка не имела сопротивления при своем вращении, то направление скоростей W_1 и W_2 совпадало с направлением лопасти, т.е. было бы $\beta_1 = \beta_2 = \psi_0$. При этом зависимость между идеальной угловой скоростью вращения турбинки ω_n и расходом Q определялась бы только геометрическим соотношением:

$$C_1 = u \operatorname{ctg} \psi_0 = \omega_n r \operatorname{ctg} \psi_0, \quad (7)$$

а так как $Q = C_1 S$ (S — площадь поперечного сечения потока), то

$$\omega_n = \frac{Q}{2S \operatorname{ctg} \psi_0}. \quad (8)$$

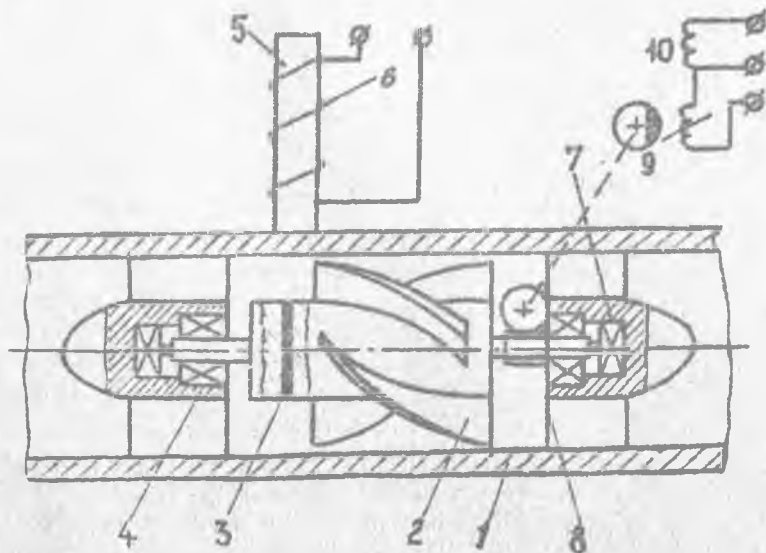
Таким образом, между ω_n и α существовала бы прямая пропорциональность, а для обеспечения плавного входа струи на лопасти необходимо, чтобы угол наклона лопастей φ_0 уменьшался с увеличением радиуса r .

В действительности, из-за сопротивления при вращении скорость вращения турбинки на 2-5% меньше ω_n , а угол выхода струи становится отличным от φ_0 . Величина S_K - скольжение турбинки относительно потока - определяется по формуле

$$S_K = \frac{\omega_n - \omega}{\omega_n}, \quad (9)$$

где ω - действительная угловая скорость вращения.

Упрощенная схема тахометрического преобразователя расхода с аксиальной турбинкой приведена на рис. 2.



Р и с. 2. Схема тахометрического расходомера с аксиальной турбинкой: 1 - корпус, 2 - ротор с винтовой крыльчаткой, 3 - магнит, 4 - радиальный подпятник, 5 - сердечник, 6 - обмотка, 7 - упорный подшипник, 8 - червячный редуктор, 9 - сердечник, 10 - катушки индуктивности датчика суммарного расхода

Уравнение движения ротора турбинки определяет реальную зависимость частоты вращения от расхода и имеет вид

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_A - M_B - M_T - M_g, \quad (10)$$

где J - момент инерции турбинки, включая и момент инерции присоединенной к ней массы потока;

M_A - движущий момент сил, приложенных к ротору со стороны потока;

M_B, M_T - моменты сопротивления сил вязкого трения и сил трения в опорах соответственно;

M_g - момент реакции тахометрического преобразователя.

Для установившегося движения ($\frac{d\omega}{dt} = 0$) имеем $M_A = M_B + M_T + M_g$.

Если определить характер зависимости моментов M_A, M_B, M_T и M_g , входящих в уравнение движения, от Q и ω , то зависимость частоты вращения турбинки f от расхода можно выразить как

$$f = A Q + B - S Q + f_0, \quad (11)$$

где A и B - величины, зависящие от конструктивных параметров преобразователя, свойств жидкости, а также и от расхода;

$S = A$ - чувствительность преобразователя;

$f_0 = B$ - постоянная величина, имеющая размерность частоты.

Следовательно, пропорциональность между расходом и скоростью вращения турбинки будет зависеть от постоянства величин A и S , которые будут определять линейность характеристики катанка расхода.

Опытным путем выяснено, что при больших числах $Re > 2300$ имеет место постоянство величин A и B , однако они меняются при переходе от турбулентного к ламинарному течению из-за изменения величины гидравлического сопротивления и перераспределения скоростей по сечению. С увеличением вязкости и уменьшением Re растут гидравлические потери на трение жидкости о турбинку. Это сужает диапазон линейной зависимости ω от Q и увеличивает погрешность измерения расхода.

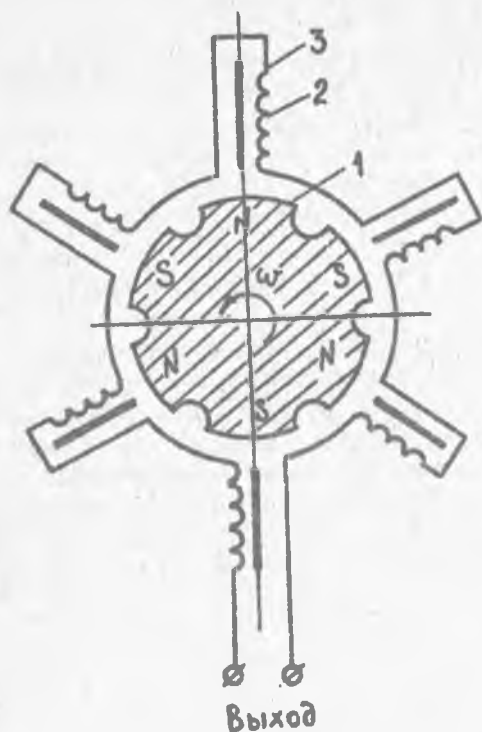
Турбинные расходомеры применяются, в основном, для измерения расходов самых различных жидкостей, за исключением очень вязких. Они реже используются для измерения расхода газа, так как из-за его малой плотности движущий момент M_d получается небольшим, несмотря на большие скорости потока. Турбинные расходомеры удачно сочетают высокую статическую точность и хорошие динамические качества, выраженные в малом значении постоянной времени. Это одна из причин, способствующих широкому распространению турбинных расходомеров с аксиальной турбиной.

Погрешность рассматриваемых расходомеров обычно не превышает $\pm(0,5-1,0)\%$, а в некоторых случаях оказывается не более $\pm 0,25\%$. Постоянная времени расходомера с аксиальной турбиной находится в пределах 1-10 мс и редко превышает указанные значения. При этом диапазон измеряемых расходов чаще всего не менее десятикратного и возрастает с увеличением проходного сечения датчика и уменьшением вязкости жидкости.

Турбинные расходомеры могут работать практически при любом сколько угодно большом давлении в трубопроводе: потери давления обычно не превышают 0,01-0,03 МПа на номинальном расходе. При использовании турбинных расходомеров практически нет ограничений по температуре измеряемой среды; расходомеры могут быть изготовлены из различных материалов, обеспечивающих химическую стойкость к агрессивной среде. Вместе с тем турбинные расходомеры весьма чувствительны к загрязнениям и механическим примесям. Это обусловлено влиянием абразивных факторов на величину сопротивления трения и износа ~~своих~~.

Наиболее существенным недостатком турбинного расходомера является его чувствительность к засорению потока на входе, поэтому обычно рекомендуется при входе в трубопровод оставлять прямые участки длиной не менее 20 диаметров трубы до расходомера и не менее 10 диаметров после расходомера. Кроме того, недостатком тахометрических расходомеров является то, что они измеряют объемные расходы, поэтому для измерения массового расхода они должны дополняться плотностемером и соответствующей ответвляющей схемой.

Для измерения угловой скорости вращения ротора турбины используют бесконтактные электротехнические преобразователи роторных систем: индукционные, емкостные, индуктивные, ~~магнитные, датчики~~



Р и с. 3. Схема выходного преобразователя скорости вращения турбинки генератора постоянного типа: 1 - многополюсный постоянный магнит; 2 - катушка индуктивности; 3 - сердечник

вателя составляет доли вольта, а при больших - 5-10 В.

Авиационные расходомеры предназначаются, как правило, для измерения мгновенного и суммарного расходов, поэтому их датчики, помимо тахометрического преобразователя мгновенной скорости турбинки, имеют преобразователь, который преобразует скорость вращения турбинки в сигнал, позволяющий подсчитывать накопленное число оборотов турбинки за любой промежуток времени. Для этого обычно используется индуктивно-импульсное устройство, которое за определенное число оборотов турбинки выдает импульс напряжения. Импульс

скопические и др. Наиболее широко применяют в авиационных расходомерах индукционные системы, представляющие собой простейшие генераторы переменного тока. Они просты по конструкции, надежны в работе и имеют достаточную выходную мощность. Вместе с ротором турбинки вращается магнит 1 (рис. 3), и магнитный поток, сцепляющийся с обмотками катушек 2, изменяется, что приводит к возникновению в них ЭДС с частотой, пропорциональной частоте вращения ротора турбинки.

Характерной особенностью тахометрических преобразователей является наличие зависимости - мости выходного сигнала от измеряемой скорости вращения. При малых частотах вращения ЭДС индукционного преобразо-

напряжения после усиления подается на электромагнит показывающего прибора, который, срабатывая, поворачивает на один зуб храповое колесо, соединенное через редуктор либо с механическим счетчиком, либо со стрелкой показывающего прибора.

Преобразователь суммарного расхода (см. рис. 2) состоит из стального сердечника 9, связанного через червячную передачу 3 с ротором турбинки и двух катушек, одна из которых имеет постоянную, а вторая — переменную индуктивность. Катушки образуют два плеча моста переменного тока. В магнитном поле второй катушки вращается стальной сердечник, то приближаясь к П-образному сердечнику катушки, то удаляясь от него и меняя тем самым магнитный поток и индуктивность катушки. Из-за изменения индуктивности катушки нарушается равновесие моста и на его диагонали появляется напряжение с частотой, равной частоте питающего напряжения (400 Гц). Это рассогласование моста используется для формирования импульса напряжения, приводящего в действие электромагнит показывающего прибора.

В последних конструкциях авиационных расходомеров выходной сигнал в виде напряжения на диагонали расбалансированного моста поступает в электронный преобразователь и далее на показывающий прибор, стрелка которого указывает остаток топлива в баках с учетом действительного количества топлива, прошедшего через датчик. В электронном преобразователе имеется интегратор, суммирующий выходные сигналы датчиков суммарного расхода каждого двигателя. Кроме того, в самолетных системах измерения расходов топлива устанавливается датчик плотности, вводящий поправку на изменение плотности рабочей жидкости.

Нормируемые метрологические характеристики тахометрических преобразователей расхода

В соответствии с ОСТ I 00181-75 нормируемыми метрологическими характеристиками измерительных преобразователей называются метрологические характеристики, количественные значения которых устанавливаются, определяются и контролируются. Нормируемые метрологические характеристики позволяют определить результат и оценить погрешность измерений, производимых в известных рабочих условиях применения средств измерения как в статическом, так и в динамическом режимах.

Согласно ГОСТ 8.009-84 и ОСТ I 00020-72 метрологические характеристики средств измерений подразделяются на общие и частные. Общие метрологические характеристики применяются для всех видов средств измерений, на которые распространяется действие стандарта. Частные метрологические характеристики применяются для отдельных средств измерений.

Каждая метрологическая характеристика в зависимости от требований, предъявляемых к средству измерений, может быть типовой или индивидуальной. Типовые метрологические характеристики нормируются в документации на средства измерений общими и теми же значениями для всех средств измерений данного типа. Индивидуальные метрологические характеристики указываются в паспорте на средство измерения индивидуальными значениями для данного экземпляра и определяются путем статистической обработки экспериментальных данных, полученных для данного экземпляра.

Для конкретных видов средств измерений часть метрологических характеристик может быть типовой и часть - индивидуальной.

К нормируемым общим метрологическим характеристикам тахометрических расходомеров относятся: диапазон измеряемых расходов; параметры рабочих условий; прямая или обратная номинальная функция преобразования; основная погрешность; дополнительные погрешности. В качестве частной метрологической характеристики у тахометрических расходомеров нормируется максимальное значение гидравлического сопротивления.

Согласно ОСТ I 03594-84 все тахометрические преобразователи в зависимости от пределов измерения объемного расхода жидкости делятся на 23 типа (табл. 2). Величина диапазона D измеряемого расхода для конкретного преобразователя ограничивается числами $Q_{мин}$ и верхним $Q_{макс}$ значениями и равна: $D = Q_{макс} - Q_{мин}$. При этом, как видно из табл. 2, для каждого типа преобразователя нормируется частота выходного сигнала на верхнем пределе измерения.

К параметрам рабочих условий тахометрических преобразователей относятся параметры внешних условий (давление, температура, влажность); параметры внешних воздействий (вибрационные, ударные, лямбейные и акустические нагрузки, частота вибрации и шумов, значения магнитных и электрических полей); характеристики измеряемой среды (предельные повышенная и пониженная температуры, максим-

Типы телеметрических расходомеров

Наименование параметра	Номера для типов																																																																																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23																																																												
Пределы измерений, л/с	Группы												3; 5																																																																						
	1												2; 5																																																																						
Условный диаметр проходного сечения, мм	4				6				10				15				20				25				30				35				40				50				60				80				100				120				150				200																						
	0.003-0.01				0.004-0.016				0.005-0.025				0.008-0.04				0.012-0.06				0.02-0.1				0.03-0.16				0.05-0.25				0.08-0.4				0.12-0.6				0.20-1.0				0.3-1.6				0.5-2.5				0.8-1.0				1.2-16.0				2.0-15.0				3.0-10.0				5.0-60.0				8.0-100.0				12.0-100.0				20.0-250.0		
Измеряемая среда для исполнения	1 Неагрессивная												2 Агрессивная												3 Неагрессивная												4 Агрессивная																																														
	1												2												3												4																																														
Частота выходного сигнала на верхнем пределе измерения, Гц	250±25												500±50												25												0.05												0.12																																		
	1												2												3												4																																														
Величина выходного сигнала на нижнем пределе измерения при сопротивлении нагрузки вторичной аппаратуры 3 кОм, В _{ЭД} , не менее	25												50												25												0.05												0.12																																		
	1												2												3												4																																														
Перепада давления на верхнем пределе измерения на измеримой среде с вязкостью не более 5 сСт, МПа, не более	0.05												0.12												0.05												0.12																																														
	1												2												3												4																																														

мальное рабочее давление). Номинальная функция преобразования (градуировочная характеристика) нормируется аналитической зависимостью, связывающей величины измеряемого расхода жидкости и частоты вращения турбинки. Функция преобразования бывает прямой или обратной. В прямой функции преобразования аргументом является измеряемая величина расхода жидкости, в обратной функции преобразования аргументом является частота вращения турбинки. Применение обратной функции преобразования предпочтительнее.

Номинальная функция преобразования тахометрического расходомера может быть типовой или индивидуальной.

Типовая функция преобразования едина для всех преобразователей одного конкретного типа. Она нормируется аналитической зависимостью. Индивидуальная функция преобразования определяется экспериментально для каждого преобразователя и представляется табличной формой записи, графиком или аналитической зависимостью. В табличном представлении функции преобразования каждому значению частоты f_i соответствует одно определенное значение величины

Q_i .

Аналитическое выражение номинальной функции преобразования тахометрических расходомеров аппроксимируется полиномом первой степени, на что указывается в отраслевом стандарте и паспорте преобразователей.

Обратная функция преобразования расходомеров имеет вид

$$Q = a f + b. \quad (12)$$

При этом коэффициенты a и b принимают конкретные значения для конкретного преобразователя (индивидуальная функция) или для всех преобразователей одного типа (типовая функция). Графическое изображение обратной функции преобразования тахометрического расходомера приведено на рис. 4.

Функция преобразования определяется экспериментально при нормальных условиях. Для тахометрических преобразователей нормальными условиям соответствуют:

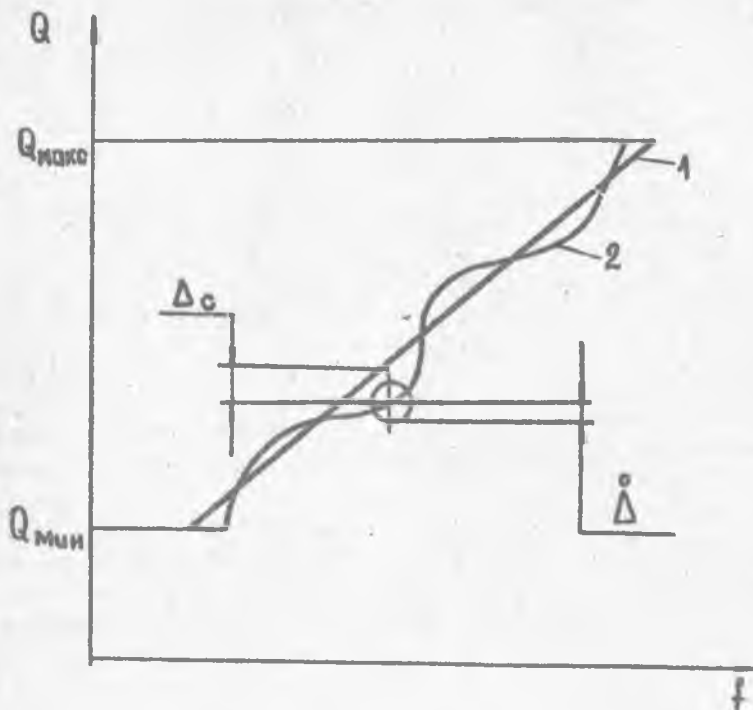
температура окружающей среды $+25 \pm 10^\circ\text{C}$;

атмосферное давление 84-107 кПа (630-800 мм рт.ст.);

относительная влажность 45-80%;

кинематическая вязкость жидкости $1 \cdot 10^{-6} \dots 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$

(1-1,5 сСт);



Р и с. 4. Обратная функция преобразования тахеометрического расходомера: 1 - номинальная функция преобразования; 2 - истинная функция преобразования

отсутствие внешних электрических и электромагнитных полей (кроме земного);

отсутствие ускорений.

В общем случае для средств измерений отдельно оценивается погрешность в нормальных условиях применения и погрешности, имеющие место при выходе влияющих величин (температуры, давления, влажности, внешних воздействий и т.п.) за пределы нормальной области, но оставшихся в пределах рабочих условий. Погрешность преобразователя в нормальных условиях применения называется основной, а погрешность, обусловленная отклонением одной из влияющих величин от нормальных значений, дополнительной. Основная погрешность средств из-

мерений обусловлена неидеальностью их собственных свойств (несовершенство конструкции, неидеальность геометрических параметров, наличие трения и зазоров в сочленениях и т.д.), т.е. отличием действительной функции преобразования от номинальной функции преобразования средств измерений в нормальных условиях.

Дополнительная погрешность обусловлена реакцией средств измерения на измерение внешних влияющих величин информационных параметров входного сигнала относительно их нормальных значений.

Основная погрешность средств измерения Δ состоит из двух составляющих - систематической Δ_c и случайной Δ (см. рис.4):

$$\Delta = \Delta_c + \Delta. \quad (13)$$

Основная погрешность тахометрических расходомеров нормируется пределом допускаемой погрешности либо пределами допускаемых составляющих основной погрешности.

Систематическая составляющая Δ_c основной погрешности нормируется пределом либо одинаково по всему диапазону измерения преобразователя, либо различными пределами на разных участках диапазона измерения. Случайная составляющая Δ основной погрешности нормируется пределом $\sigma(\Delta)$ допустимого среднеквадратического отклонения с вероятностью $p = 0,95$ $\Delta = 2\sigma(\Delta)$.

Дополнительная погрешность тахометрических расходомеров не нормируется. Стандарт устанавливает связь пределов дополнительной и основной погрешностей. Пределы допускаемых погрешностей устанавливаются в виде абсолютных Δ , относительных δ и приведенных $\delta_{пр}$ погрешностей. Приведенной погрешностью $\delta_{пр}$ называется отношение абсолютной погрешности Δ к нормируемому значению и выражается в процентах. В качестве нормирующего значения принимают диапазон изменения частоты вращения турбинки расходомера $D_1 = f_{max} - f_{min}$ (для прямой функции преобразования) или рабочий диапазон изменения расхода $D_2 = Q_{max} - Q_{min}$ (для обратной функции преобразования).

Основные метрологические характеристики подлежат контролю перед постановкой на объект и далее периодически в течение установившегося периода преобразователей. Результаты проверок фиксируются в технической документации преобразователя.

Контроль нормируемых метрологических характеристик измеритель-

ных преобразователей в общем случае производится в нормальных условиях и при раздельном воздействии влияющих величин, соответствующих рабочим условиям. Для тахометрических расходомеров перечень влияющих величин не установлен, и проверки при раздельном воздействии влияющих величин, соответствующих рабочим условиям, не проводятся.

Определение основных метрологических характеристик турбинных расходомеров производится на специальном стенде, работающем, как правило, на воде. Стенд позволяет по образцовому прибору установить значения варьируемых измеряемых расходов на входе в преобразователь и измерить по другому образцовому прибору величину частоты вращения турбинки. Применяемые в поверочных стендах измерительные приборы должны иметь погрешности на порядок ниже, чем нормируемая величина основной погрешности преобразователя. Экспериментальные данные об индивидуальной функции преобразования, снятые на стенде и представленные в табличной форме, служат основой для определения основных метрологических характеристик. Количество экспериментальных точек n при каждой поверке устанавливается предприятием-разработчиком расходомеров и не должно быть менее восьми. Экспериментальные данные по индивидуальной функции преобразования аппроксимируются с помощью метода наименьших квадратов линейной зависимостью вида (12). При этом определяются численные значения коэффициентов a и b одним из методов интерполяции экспериментальных данных. Затем определяются величины составляющих основной погрешности.

Для каждой экспериментальной точки определяется значение величины расчетного расхода

$$Q_{i\text{расч}} = a f_i + b, \quad (14)$$

где f_i — среднее значение частоты из ряда замеренных при заданном расходе Q_i .

Далее для каждой экспериментальной точки определяются величины систематической составляющей основной погрешности

$$(\Delta_c)_i = Q_{i\text{зам}} - Q_{i\text{расч}} \quad (15)$$

и их приведенные величины

$$(\delta_{np})_i = \pm \frac{(\Delta_G)_i}{D_2} 100\% = \pm \frac{Q_{i \text{ зам}} - Q_{i \text{ расч}}}{Q_{\text{макс}} - Q_{\text{мин}}} 100\% \quad (16)$$

Среднеквадратическое значение случайной составляющей основной погрешности определяется по формуле

$$\sigma(\delta_{np}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\delta_{np})_i^2}{n-1}} 100\% = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{i \text{ зам}} - Q_{i \text{ расч}})^2}{n-1}} \frac{100\%}{D_2} \quad (17)$$

Величины δ_{np} и $\sigma(\delta_{np})$ не должны превышать допустимые величины соответствующих составляющих:

$$\delta_{np, \text{макс}} \ll 0,5\% \quad (18)$$

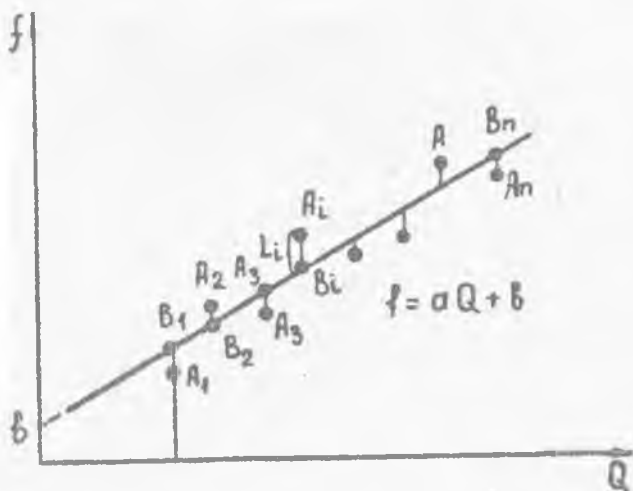
$$\sigma(\delta_{np}) \ll 0,25\% \quad (19)$$

Интерполяция экспериментальных данных методом наименьших квадратов

Очень часто при обработке экспериментальных данных возникает необходимость определения функциональной зависимости, которая бы наилучшим образом удовлетворяла экспериментальным точкам (задача нахождения интерполирующей кривой). Одним из методов нахождения интерполирующих кривых является метод наименьших квадратов. Суть метода наименьших квадратов заключается в следующем.

Исходя из физических соображений выбирается вид интерполирующей функции (линейная зависимость, парабола или экспонента и т.д.). Коэффициенты искомой кривой подбирают так, чтобы наилучшим образом удовлетворить экспериментальным точкам, а именно, чтобы сумма квадратов расстояний от экспериментальных точек до интерполирующей кривой была минимальной. Так, для исследуемого турбинного расходомера при интерполяции экспериментальных точек (рис. 5) находится уравнение искомой прямой, которое может быть записано в виде

$$Q = a_f + b \quad (20)$$



Р и с. 5. К определению аналитического выражения зависимости частоты вращения турбины расходомера от величины расхода по методу наименьших квадратов

Условие для отыскания аналитической зависимости запишем в виде

$$\sum_{i=1}^n \Delta_i^2 = \min,$$

где Δ_i - разность ординат экспериментальных A_i и теоретических B_i точек,

т.е.

$$\sum_{i=1}^n [(a f_i + b) - A_i]^2 = \min.$$

Минимум сумм ищется по правилу дифференциального подсчета путем приравнения нулю производных этой суммы по параметрам a и b .

Решение получаем в следующем виде:

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n f_i A_i - \sum_{i=1}^n f_i \sum_{i=1}^n A_i}{n \sum_{i=1}^n f_i - \left(\sum_{i=1}^n f_i \right)^2}, \quad (21)$$

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum_{i=1}^n f_i \sum_{i=1}^n Q_i - \sum_{i=1}^n f_i \sum_{i=1}^n f_i Q_i}{n \sum_{i=1}^n f_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n f_i \right)^2}, \quad (22)$$

где Q - число замеров.

Суммирование производится по всем замерам.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Установка (рис. 6) состоит из гидробака 1, в котором размещается рабочая жидкость, насоса 2 колесчатого типа с приводом от электродвигателя 5 постоянного тока через фрикционный редуктор 4 с измеряемыми передаточными отношениями; тахометра насоса 6; шитка управления с размещенными на нем счетчиками оборотов 7 и 8, электронным преобразователем, выключателями и сигнальными лампочками. На шитке управления имеются гнезда для подключения цифрового частотомера 9 и цифрового вольтметра 10. Питание установки осуществляется от сети постоянного тока 27 В и переменного тока 220 В, 50 Гц.

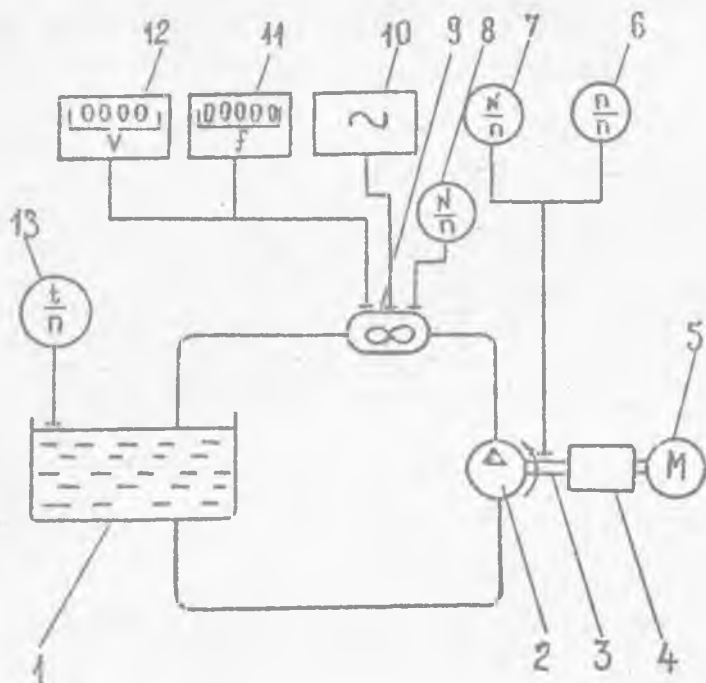
Рабочая жидкость прокачивается через испытуемый патчики мгно-венный суммирующий расходомер топливной системы самолета ТУ-154 марки ДРЕНЦИОАТ с помощью колесчатого насоса БНК-4, который имеет строго линейную зависимость расхода от частоты вращения ротора насоса:

$$Q = K_T N_{\text{БНК}}, \quad (23)$$

где K_T - тарировочный коэффициент насоса БНК-4, $K_T = 6,57 \cdot 10^{-5}$ м³;

$N_{\text{БНК}}$ - частота вращения ротора насоса, с⁻¹.

Расход жидкости задается путем изменения частоты вращения насоса БНК-4 с помощью регулируемого фрикционного редуктора 4. Частота вращения насоса контролируется по указателю стрелочного тахометра $N_{\text{ТХ}}$, а суммарное число оборотов - по счетчику электрических импульсов 7, формируемых контактным прерывателем 3. За один оборот насоса контактный прерыватель вырабатывает один импульс напряжения на электромагнит счетчика оборотов. Тахометр используется для установления режима работы насоса БНК-4. Частота



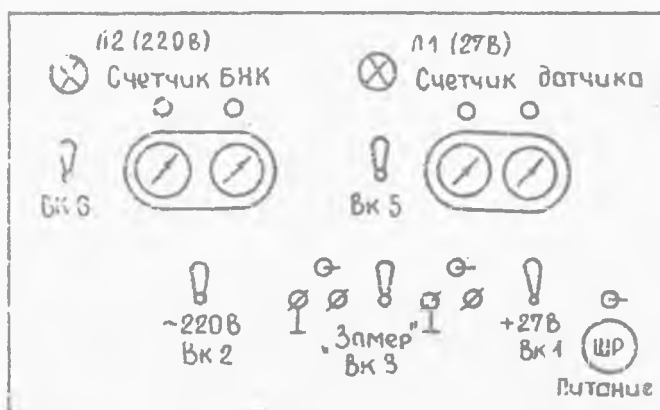
Р и с. 6. Схема экспериментальной установки: 1 - бак; 2 - центробежный насос БНК-4; 3 - контактный переключатель; 4 - фрикционный редуктор; 5 - электродвигатель Л200; 6 - указатель частоты вращения насоса; 7, 8 - электромеханический счетчик; 9 - испытуемый датчик; 10 - электронный осциллограф; 11 - цифровой частотомер; 12 - цифровой вольтметр; 13 - измеритель температуры жидкости

вращению ротора насоса $\Pi_{\text{БНК}}$ определяется с помощью счетчика элементарных импульсов 7. Частота входного сигнала датчика частоты вращения турбинки преобразователя мгновенного расхода измеряется частотомером, а величина амплитуды - с помощью цифрового вольтметра. Форма сигнала контролируется на экране осциллографа.

Для подключения питания 27 и 220 В используются тумблеры ВК1 и ВК2 соответственно (рис. 6, 7). Наличие питания +27 и 220 В контролируется с помощью ламп Л1 и Л2. При этом в. время работы на ус-

тановке необходимо учитывать, что при включении тумблера Вк1 (27 В) включается электродвигатель 5 привода насоса 2, поэтому с помощью фрикционного редуктора 4 в этом случае устанавливается минимально возможное значение частоты вращения насоса.

Переключатель Вк3 ("Замер") используется для включения счетчика суммарных оборотов насоса и турбинки, а также для подключения сигнала к клеммам электронного осциллографа и частотомера. Для раздельного подключения счетчика оборотов насоса и турбинки предусмотрены тумблеры Вк4 и Вк5, установленные непосредственно на корпусах счетчиков. На панели (щитке) управления установкой (см. рис. 7) кроме тумблеров Вк1, Вк2, Вк3, Вк4, Вк5, сигнальных ламп Л1 и Л2, выходных клемм (С→) для подключения осциллографа, цифрового вольтметра и частотомера, входного (С←) разъема расположены счетчики оборотов насоса и турбинки.



Р и с. 7. Щиток управления

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

Подготовка установки к работе

1. Сзнакомиться с устройством и работой экспериментальной установки.

2. Установить все переключатели в положение "Выключено", а счетчики выставить на нуль.
3. Изучить технологию работы с частотомером, цифровым вольтметром и осциллографом по инструкциям приборов.
4. Соединить шнурами входные гнезда частотомера, цифрового вольтметра и осциллографа с клеммами на щитке управления.
5. Подключить вилки питания 220 и 27 В к розеткам общих сетей. При этом обратить внимание на соответствие меток "+" на розетке и вилке питания 27 В.
6. Подключить шнур питания частотомера, вольтметра и осциллографа к сети 220 В и включить тумблер "Сеть" для прогрева аппаратуры. Подготовить аппаратуру к работе.
7. Вращением маховичка фрикционного редуктора установить минимальную частоту вращения насоса (вывернуть в сторону уменьшения до упора).
8. Включить двигатель насоса выключателем "Сеть 27 В" и, плавно вращая маховичок редуктора в сторону увеличения частоты вращения ротора насоса, удалить воздушную пробку из трубопроводов (контроль по стеклянному баллончику в нагнетающем трубопроводе).

Снятие функции преобразования
турбинного расходомера

1. Установить частоту вращения насоса БНК-4 равной 600 мин^{-1} .
2. Убедиться, что счетчики импульсов частоты вращения насоса и датчик суммарного расхода установлены на нулевой деления.
3. Включить тумблер "Замер" и секундомер. По истечении 60 с выключить тумблер "Замер" и зафиксировать показания счетчиков. Результаты замеров занести в табл. 3 протокола испытания.
4. По показаниям электронного цифрового частотомера зарегистрировать 6-10 значений частоты вращения турбины датчика мгновенного расхода. Результаты занести в табл. 3.
5. С помощью цифрового вольтметра измерить амплитуду сигнала A , вырабатываемого датчиком мгновенного расхода. Результат занести в табл. 3.
6. Повторить измерения для других частот вращения насоса БНК-4 (других расходов), устанавливая частоты вращения насоса шагом 200 мин^{-1} . Предельная частота вращения насоса 1800 мин^{-1} .

Измерительные данные при серии бросов преобразования
тахометрического преобразования

Номер заезда, i	1	2	3	4	5	6	7
$\nu_{таз}$, мин ⁻¹	600	800	1000	1200	1400	1600	1800
$\nu_{внк} = \frac{\nu_{сч.внк}}{60}$, Гц							
$\nu_{сч.туро} (\tau = 0,01)$							
f_x , Гц							
A, B							
$\nu_{зам}$, м ^{3/с}							
$f_{ер}$, Гц							
$\kappa_{туро} = \frac{\tau f_{ер}}{\tau_{сч.туро}}$							
$\nu_{раон}$, м ^{3/с}							
$\Delta c = \nu_{зам} - \nu_{раон}$, м ^{3/с}							
$\nu_{пр}$, %							

7. Вращением маховичка фрикционного редуктора установить насосу БНК самую минимальную частоту вращения и только после этого выключателем Вк1, выключить его электродвигатель.

В н и м а н и е. Категорически запрещается выключать электропривод при частоте вращения вала насоса БНК-4 более $n_{\text{БНК}} = 200 \text{ мин}^{-1}$, замеренной по тахометру.

8. Отключить установку, осциллограф, вольтметр и частотомер от сети питания.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Подсчитать значения расхода жидкости для каждой частоты вращения насоса по формуле

$$Q_i = K_T n_{\text{БНК}} \nu$$

где $n_{\text{БНК}}$ - частота вращения насоса, Гц;

$$K_T = 6,57 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3.$$

2. Определить средние значения частот вращения турбинки преобразователя расхода $f_{cp i}$ для каждого значения расхода Q_i :

$$f_{cp i} = \frac{\sum_{k=1}^m f_{ik}}{m},$$

где f_{ik} - значения замеренных k -х частот при i -х значениях расхода.

3. Для каждого значения Q_i (частоты вращения насоса по тахометру $n_{\text{тах } i}$) подсчитать коэффициент передачи (передаточное отношение червячного редуктора преобразователя) по уравнению

$$K_{\text{турб}} = \frac{f_{cp i}}{n_{\text{сч. турб } i}}.$$

4. По данным расчета $K_{\text{турб } i}$ определить среднее значение

$$K_{\text{турб ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n K_{\text{турб } i}}{n}.$$

5. По значениям величин Q_i и $f_{cp i}$ определить аналитическое выражение $Q = a f + b$ зависимости частоты вращения турбинного расходомера от расхода по методу наименьших квадратов. Определе-

ние коэффициентов a и b уравнения линейной регрессии производить на ЭВМ "Электроника-БЗ-28", используя стандартную программу и инструкцию по ее использованию. Для этого:

- ввести стандартную программу в ЭВМ с магнитной ленты;
- проверить правильность введения программы по сумме кодов;
- определить значения коэффициентов a и b .

6. В соответствии с полученным уравнением для каждого значения f_{op} рассчитать значение $Q_{расч}$, и по формулам (15) и (16) определить абсолютные и приведенные величины систематической составляющей основной погрешности.

7. По формуле (17) определить среднеквадратическое значение случайной составляющей основной погрешности. Сравнить величины $\delta_{пр}$ и $\sigma(\delta_{пр})$ с допустимыми значениями.

8. Построить экспериментальную и теоретическую зависимости $Q = af + b$.

9. Построить зависимость амплитуды сигнала A от частоты вращения f_{op} .

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Описание датчика ДТРС-10 и принципа его работы.
2. Схема экспериментальной установки.
3. Таблица результатов измерений и расчетных параметров.
4. Графики.
5. Выводы по работе.

В выводах указать область рабочего диапазона измерений расхода, уравнение $Q(f)$, максимальное значение величины систематической составляющей и среднеквадратическое значение случайной составляющей основной погрешности, минимальную амплитуду выходного сигнала преобразователя при $Q_{мин}$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите методы измерения расхода жидких и газообразных веществ. Какие из них наиболее подходят для применения в аэрационных системах измерения расхода топлива?

2. В чем заключается сутьность измерения расхода тахометрическим методом?

3. От каких факторов зависит частота вращения аксиальной турбины в турбинном расходомере?

4. Что такое величина скольжения аксиальной турбины относительно потока?

5. Каково назначение и устройство преобразователя суммарного расхода в турбинном расходомере?

6. Назовите нормируемые метрологические характеристики тахометрических расходомеров. Как они контролируются?

7. В чем сутьность "метода наименьших квадратов" при интерполяции экспериментальных данных?

8. Какой характер носит зависимость величины мгновенного расхода от частоты вращения аксиальной турбины в турбинных расходомерах?

9. Почему турбинные расходомеры редко применяются для измерения расходов газа?

Библиографический список

И л ь к и н с к и й В.М. Системы контроля авиационных силовых установок. М.: Транспорт, 1980. 85 с.

Б о д н е р В.А. Приборы первичной информации: Учебник для авиационных вузов. М.: Машиностроение, 1981. 344 с.

К р е м л е в с к и й П.П. Расходомеры и счетчики количества. Л.: Машиностроение, 1975. 776 с.

ОСТ I 03594-84. Датчики расхода жидкости турбинные для наземных и летных испытаний. Типы и основные параметры, технические требования. М.: НИИСУ, 1984. 14 с.

ОСТ I 00020-72. Средства измерений при испытаниях летательных аппаратов. Основные положения по нормированию метрологических характеристики. М.: НИИСУ, 1972. II с.

ОСТ I 00111-75. Система единства измерений при испытаниях летательных аппаратов. Преобразователи измерительные. Нормируемые метрологические характеристики. М.: НИИСУ, 1975. 14 с.

ГОСТ 8.003-84. Нормирование и использование метрологических характеристик средств измерений. М.: Изд-во стандартов, 1985. 35 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК
ТУРБИНЫХ РАСХОДОМЕРОВ ТОПЛИВНЫХ СИСТЕМ
СИЛОВЫХ УСТАНОВОК ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Составитель К а н у н н и к о в Игорь Петрович

Редактор Л.Я.Чегодаева
Техн.редактор Г.А.Усачева
Корректор Е.Д.Антонова

Подписано в печать 13.03.92. Формат 60x84^I/16 .
Бумага оберточная. Печать офсетная.
Усл.пл.л. 1,86. Усл.кр.-отт. 2,0.Уч.-изд.л. 1,83.
Тираж 200 экз. Заказ ~ 75. Бесплатно.

Самарский орден Трудового Красного Знамени
авиационный институт имени академика С.П.Королева.
443086. Самара, Московское шоссе, 34.

Участок оперативной полиграфии
Самарского авиационного института.
443001. Самара, ул. Ульяновская, 18.