

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П.КОРОЛЕВА

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ
НОРМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ
ТУРБОВИНТОВОГО ДВИГАТЕЛЯ**

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

Самара 2003

УДК 629.7.036.018(075).

Методические указания к лабораторной работе знакомят студентов с методикой определения нормальных значений параметров классического ТВД при испытании двигателя на режимах, подобных его работе в стандартных атмосферных условиях.

Методические указания предназначены для студентов, изучающих курс "Испытания ВРД".

Методические указания подготовлены на базе лабораторной работы поставленной В.А.Григорьевым и В.Г.Масловым.

Составитель: В.А.Григорьев

Рецензент: к.т.н., доц. Ю.В.Киселев

Цель работы: Практическое овладение методикой определения нормальных значений параметров одновального ТВД путем испытания на режимах, подобных его работе в стандартных атмосферных условиях.

Исходя из указанной цели, в работе ставятся *следующие задачи*:

1. Овладение методикой экспериментального определения дроссельной характеристики ТВД.
2. Освоение одной из методик экспериментального определения нормальных значений параметров ТВД.
3. Изучение методов расчета температуры газа перед турбиной ТВД по результатам испытаний.
4. Приобретение практических навыков проведения стендовых испытаний ТВД с электрическим тормозом.

1 Порядок проведения работы

Лабораторная работа выполняется в определенной последовательности.

1. Ознакомление с объектом испытания и схемой его препарирования.
2. Ознакомление с особенностями системы измерений на учебном испытательном стенде при проведении испытаний ТВД.
3. Изучение техники безопасности при работе на испытательном стенде с ТВД.
4. Ознакомление студентов, участвующих в проведении эксперимента, с их рабочими местами.
5. Уточнение на каждом рабочем месте методики проведения испытания ТВД.
6. Снятие экспериментальной дроссельной характеристики ТВД.
7. Обработка результатов эксперимента, приведение параметров двигателя к стандартным атмосферным условиям (САУ) и построение стендовой дроссельной характеристики ТВД.
8. Определение нормальных значений параметров ТВД на взлетном, максимальном продолжительном и крейсерском режимах работы.
9. Расчет нормальных значений температуры газа перед турбиной ТВД по результатам испытания.
10. Оформление и сдача отчета по лабораторной работе.

Работа проводится в учебной лаборатории кафедры ТДЛА (корпус 11) бригадами по 5... 7 человек (студенческая подгруппа разбивается на две бригады). Каждый студент обязан до прихода на лабораторную работу изучить данное руководство и просмотреть соответствующие разделы в лекциях и рекомендуемой литературе.

Занятия начинаются с контроля знаний студентов. К выполнению лабораторной работы допускаются студенты, уяснившие её цель и задачи, изучившие методики проведения испытаний ТВД, обработки результатов эксперимента и определения нормальных значений параметров ТВД, для различных режимов эксплуатации. После уточнения этими студентами неясных моментов в работе и ознакомления с объектом испытания и испытательным стендом, а также с правилами техники безопасности при работе на стенде с ТВД проводится испытание двигателя. Результаты эксперимента заносятся в протокол и обрабатываются (один режим работы двигателя — на одного или двух студентов).

Студенты, не допущенные к выполнению лабораторной работы из-за плохой подготовки или пропустившие её по болезни, должны выполнить её с другой группой по разрешению преподавателя, ведущего в данные часы занятия, при наличии свободных рабочих мест (максимальное допустимое число их в бригаде не должно превышать 9).

2 Краткие сведения о режимах работы и характеристиках ТВД

В условиях эксплуатации авиационные ГТД работают в широком диапазоне режимов, обеспечивающих получение потребных для летательного аппарата величин тяг. Режим работы задается с помощью рычага управления двигателем (РУД).

В отличие от ТРД режим работы ТВД определяется заданием не одного, а двух независимых параметров, например, приведенной частоты вращения $n_{пр}$ и приведенного расхода топлива $G_{мпр}$ или частоты вращения n и эквивалентной мощности $N_э$ и т.п.

Под характеристиками ТВД понимают зависимости основных данных двигателя от величин, характеризующих режим и условия его работы.

Дроссельной характеристикой ТВД называют зависимость его основных данных и параметров (эквивалентной мощности, удельного расхода топлива и т.д.) от расхода топлива или частоты вращения ротора ВД для заданных условий полета и программы регулирования.

У одновальных ТВД изменение режима работы производят чаще всего изменением расхода топлива при сохранении постоянной частоты вращения ротора, что достигается применением воздушного винта изменяемого шага или нагружением вала винта с помощью гидравлического или электрического тормоза. Именно поэтому дроссельную характеристику таких двигателей строят в зависимости от расхода топлива.

Существует следующая номенклатура основных режимов работы ТВД.

Максимальный — установившийся режим работы, характеризуемый максимальной мощностью N_{max} при заданной частоте вращения. Ограничивается временем работы обычно не более 5 мин. Этот наиболее напряженный режим предназначен для взлета, достижения максимальной скорости полета и выполнения различных маневров.

Максимальный режим работы ТВД на земле ($H = 0$, $M = 0$) при взлете летательного аппарата называют взлетным.

Максимальный продолжительный – установившийся режим работы, характери-

зубый пониженным, по сравнению с максимальным режимом, значением температуры газа перед турбиной, при которой двигатель может работать лишь с ограниченной по времени общей наработкой. На данном режиме ТВД развивает, как правило, мощность $N_{max пр} = (0,85...0,90)N_{max}$. Максимальный продолжительный режим работы используется при наборе высоты полета.

Крейсерский — установившийся режим работы, характеризуемый, по сравнению с максимальным продолжительным режимом, пониженным значением температуры газа перед турбиной, которое обеспечивает работу двигателя в течение неограниченного времени за ресурс. Крейсерских режимов работы используется, как правило, несколько. Это основные режимы при эксплуатации двигателя на летательных аппаратах. Мощность ТВД на этих режимах обычно составляет $N_{кр} = (0,4...0,85)N_{max пр}$.

При изменении условий окружающей среды и одном и том же положении РУД система регулирования автоматически поддерживает заданный режим работы двигателя.

3 Объект испытания

Объект испытания представляет собой ТВД, выполненный на базе вспомогательной силовой установки ДГ-4М турбовального типа.

Двигатель ДГ-4М является одновальным (рис.1). Он имеет одноступенчатый центробежный компрессор и одноступенчатую радиально-осевую турбину. Камера сгорания трубчатой конструкции расположена тангенциально к сопловому аппарату турбины. Частота вращения ротора двигателя на всех указанных выше режимах работы сохраняется постоянной и равной $462,5 \text{ с}^{-1}$. Редуктор двигателя имеет передаточное число $i = 4,625$, поэтому частота вращения вала воздушного винта 100 с^{-1} .

В табл. 1 приводятся основные технические данные учебной двигательной установки – ТВД на базе двигателя ДГ-4М в сравнении с параметрами современных авиационных турбовинтовых двигателей ($H = 0, M = 0$).

Таблица 1.

№ п/п	Двигатели	Фирма разработчик	Назначение двигателя	N_9	G_9	π_k^*	T_T^*	C_9
				кВт	кг/с		К	кг/кВт ч
1	ТВД на базе ДГ-4М	Калужский моторный завод	Учебная установка	42.0	1.46	2.5	783	1.210
2	TPE 331-3	Эрисерч	Легкий пассажирский самолет	665.3	3.50	10.7	1277	0.340
3	CT7-5	Дженерал Электрик	Самолет местных воздушных линий	1240.2	4.5	17.0	1370	0.287
4	Тайн RTy-20	Роллс-Ройс	Пассажирский самолет	4489.6	21.0	13.5	1240	0.271
5	T-56-A18	Аллисон	Самолет ПЛО	3919.2	14.5	9.7	1450	0.320

Видно, что параметры ТВД на базе ДГ-4М не характерны для современных турбовинтовых двигателей. Это объясняется спецификой требований, предъявляемых к ВСУ данного типа, а также использованием на учебной установке пониженных режимов работы.

4 Особенности испытательного стенда, измеряемые параметры и схема препарирования двигателя

Испытания ТВД ДГ-4М для определения нормальных значений параметров на различных режимах работы проводятся на стенде 1 учебной лаборатории ВРД кафедры ТДЛА.

Схема препарирования ДГ-4М приведена на рис.1. При испытании двигателя измеряются следующие параметры:

1. Крутящий момент на валу воздушного винта $M_{кр}$, развиваемый двигателем. Измерение осуществляется методом поглощения мощности с помощью электрического тормозного устройства, выполненного на базе генератора трехфазного тока С-75. Статор тормозного устройства находится в вывешенном состоянии, т.е. он установлен на подшипниках. Это обеспечивает статору степень свободы в плоскости действия крутящего момента.

Во время работы двигателя крутящий момент с вала воздушного винта передается на жестко связанный с ним ротор тормоза. Если при этом в обмотку возбуждения генератора подается напряжение, то происходит взаимодействие магнитных полей статора и ротора. Ротор тормозится, а на статоре тормозного устройства возникает реактивный момент, равный по величине крутящему моменту ротора. На рычаге определенной длины, жестко прикрепленном к статору, измеряется усилие с помощью вибрационно-частотного первичного преобразователя ДДВ и электронно-цифрового частотомера.

Вырабатываемая при этом генератором электрическая энергия, мощность которой равна поглощаемой мощности, умноженной на КПД генератора, подается на балластный реостат постоянного сопротивления. Здесь она переходит в тепло, рассеиваемое в окружающую среду.

Плавное регулирование величины поглощаемой тормозным устройством мощности при постоянном электрическом сопротивлении балластного реостата осуществляется путем изменения напряженности магнитного поля статора генератора. Это производится с пульта управления изменением напряжения в обмотке возбуждения генератора.

Схема измерения крутящего момента приведена на рис.2.

2. Тяга реактивной струи ТВД $P_{рс}$. Измеряется с помощью силоизмерительного устройства, состоящего из динамометрической платформы, на которой установлен двигатель с тормозом, подвешенной на гибких лентах к неподвижной станине. Перемещение платформы через систему тяг и рычагов передается на весовую головку РП-13-100Ц (маятниковый динамометр).

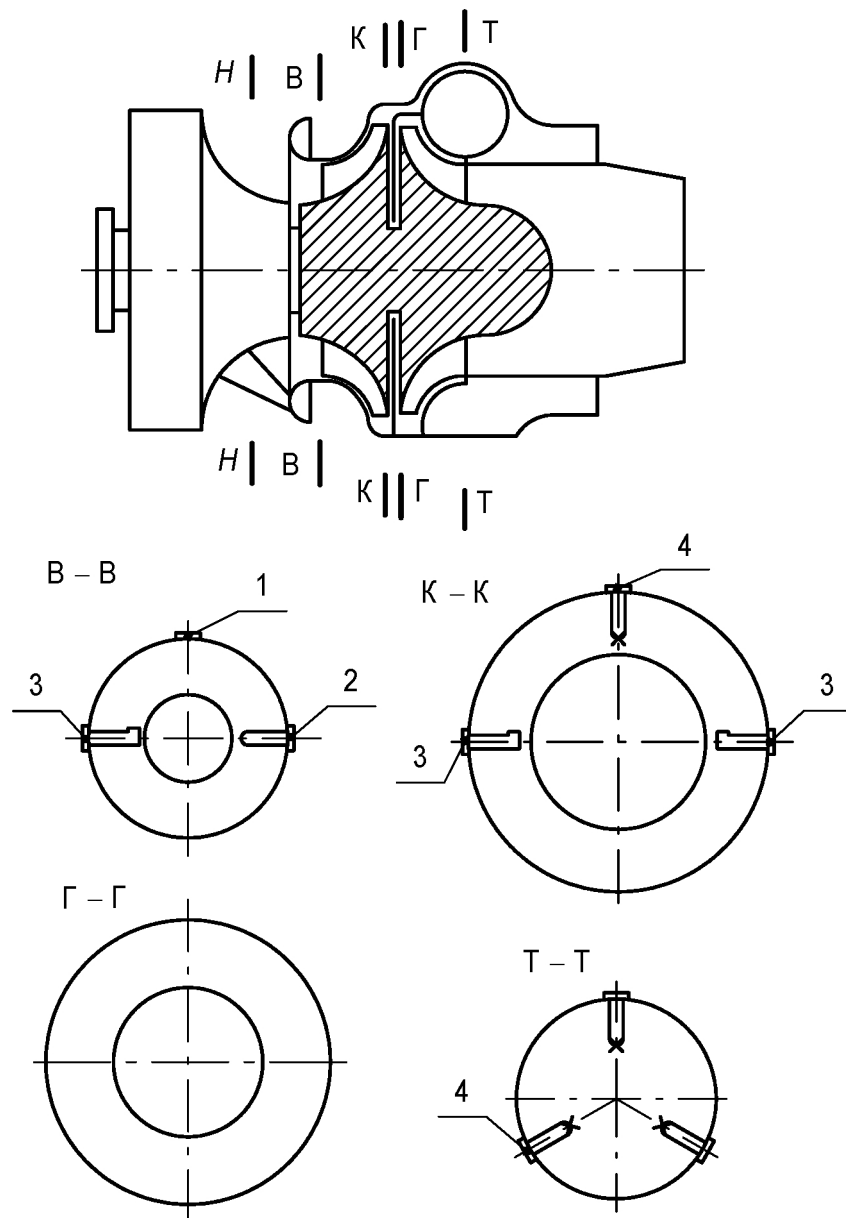


Рис. 1. Схема ТВД ДГ-4М и препарирования его проточной части: 1 — приемник статического давления; 2 — термометр электросопротивления; 3 — приемник давления торможения; 4 — термопара

3. Частота вращения ротора n . Измеряется частотным тахометром ТСФУ1-4 с первичным преобразователем ДТЭ-2, подсоединенным к двигателю. Для визуального контроля используется магнитоиндукционный тахометр ИТЭ-1. Он работает с тем же первичным преобразователем ДТЭ-2.
4. Давление топлива перед форсунками p_m для косвенного измерения расхода топлива. Измеряется образцовым пружинным манометром.

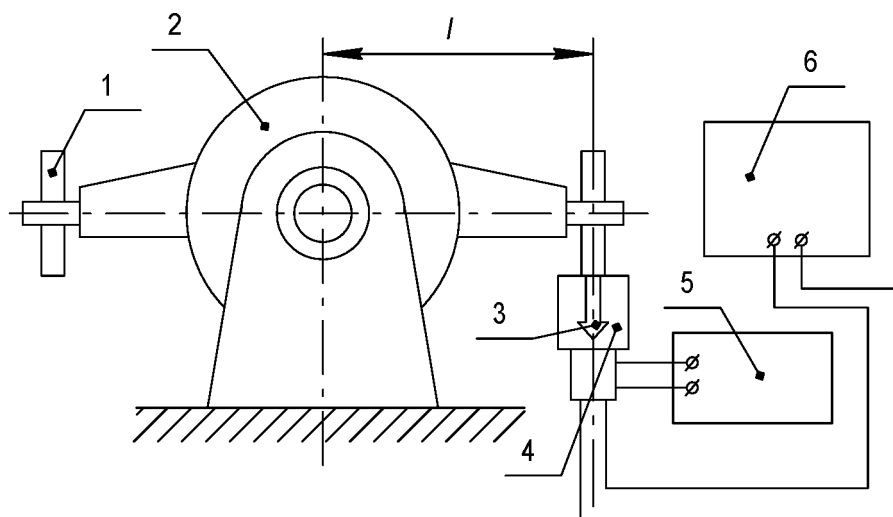


Рис. 2. Схема измерения крутящего момента: 1 — противовес; 2 — вывешенный статор генератора; 3 — усилие F ; 4 — вибрационно-частотный первичный преобразователь силы; 5 — блок питания; 6 — электронно-цифровой частотомер

5. Расход топлива G_m . Измеряется объемным расходомером (штихпробером), снабженным системой автоматического отсчета времени опорожнения мерного объема с помощью фотодиодов электросекундомера П-30, или же по перепаду давления на форсунках с использованием градуировочной зависимости.
6. Перепад полным и статическим давлением на входе в компрессор Δp_B . Измерение осуществляется жидкостным манометром, заполненным дистиллированной водой.
7. Температура воздуха на входе в двигатель ($t_H = t_B^*$). Измеряется термометром электросопротивления с первичным преобразователем типа П-1 и вторичным прибором — логометром, шкала которого проградуирована в градусах Цельсия.
8. Температура торможения воздуха за компрессором t_K^* . Измеряется хромелькопелевой термопарой с регистрацией величины термоэлектродвижущей силы милливольтметром, шкала которого проградуирована в градусах Цельсия.
9. Температура торможения воздуха за турбиной t_T^* . Измеряется хромель-алюмелевыми термопарами с регистрацией величины термоэлектродвижущей силы милливольтметром, шкала которого проградуирована в градусах Цельсия.

5 Методика экспериментального определения нормальных значений параметров ТВД

Одна из основных целей подобного испытания ТВД состоит в проверке нормальных значений параметров техническим условиям.

Оценку соответствия основных технических данных (ОТД), полученных экспериментальным путем, заданным техническим условиям (ТУ) у всех серийных и опытных ТВД проводят в стандартных атмосферных условиях.

Нормальными значениями параметров (НЗП) данного ТВД называют его индивидуальные ОТД, измеренные в САУ на заданных в ТУ режимах работы. ТВД имеет две степени свободы, поэтому для определения его НЗП должны быть известны два параметра, заданные ТУ, например, $n_{\text{норм}}$ и $N_{\text{э норм}}$.

Большинство испытаний ТВД происходит в условиях, отличающихся от САУ. В этих условиях под нормальными значениями параметров ТВД понимают такие, какие он будет иметь в САУ при положении регулирующих органов в позиции, соответствующей их отладке на заданные для каждого режима нормы эквивалентной мощности и частоты вращения [2]. В технических условиях для данной серии ТВД оговариваются величины $n_{\text{норм}}$ и $N_{\text{э норм}}$ норм для всех режимов работы, а также величины допустимых отклонений от них.

Для определения НЗП серийных ТВД при контрольно-сдаточных испытаниях используют специальные коэффициенты пересчета, заранее вычисленные с учетом закона регулирования и некоторого диапазона изменения условий окружающей среды.

У опытных ТВД нормальные значения параметров определяют путем испытания на режимах, подобных их работе в САУ. В этом случае знания закона регулирования не требуется, достаточно иметь ТУ на $n_{\text{норм}}$ и $N_{\text{э норм}}$ для всех режимов работы.

Экспериментальную дроссельную характеристику одновального ТВД тогда снимают при

$$n_{\text{изм}} = \frac{n_{\text{норм}}}{\sqrt{\frac{288,16}{T_n}}}$$

где T_n — фактическое значение температуры воздуха на входе в двигатель при испытании.

Параметры двигателя, приведенные к САУ и принадлежащие заданному значению $N_{\text{э норм}}$, будут соответственно нормальными значениями этих параметров для данного ТВД (рис.3).

Рассмотренную методику экспериментального определения нормальных значений параметров ТВД возможно реализовать лишь на испытательных стендах, оборудованных тормозным устройством, позволяющим измерять величину поглощаемой мощности, и специальной топливной системой.

5.1 Порядок проведения испытания

За 15... 20 минут до начала эксперимента включают все приборы стендовой системы измерения. Прогрев аппаратуры необходим для стабилизации её характеристик. После ознакомления со стендом преподаватель распределяет студентов по рабочим местам. Далее испытание ТВД проводится в следующей последовательности:

1. Осуществляется запуск двигателя. Указанные операции, а также перевод на нужный режим работы и выключение двигателя выполняются штатным персоналом лаборатории.

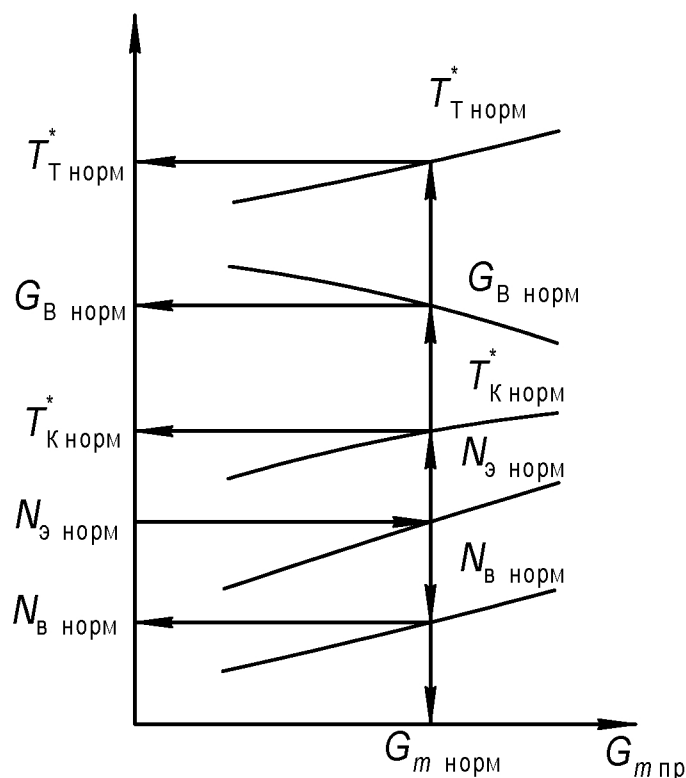


Рис. 3. Схема определения нормальных значений параметров ТВД при $n_{пр} = n_{норм} = \text{const}$

Во время прогрева двигателя каждый студент производит оценку деления шкал приборов и практикуется в измерении параметров ТВД на различных рабочих местах по указанию преподавателя.

2. Двигатель выводится на первый крейсерский режим работы $N_в = N_{в\text{кр}1}$ при частоте вращения ротора

$$n = \frac{n_{норм}}{\sqrt{\frac{T_H}{288,16}}}; \left(\bar{n} = \sqrt{\frac{T_H}{288,16}} 100 [\%] \right),$$

где $n_{норм}$ — нормальное значение частоты вращения ротора, заданное в ТУ на двигатель ($n_{норм} = 462,5 \text{ c}^{-1}$ для всех режимов работы),

T_H — фактическая температура воздуха на входе в двигатель в момент испытания.

3. После подачи оператором звукового сигнала (звонка) каждый студент производит измерение закрепленного за ним параметра двигателя и запись результатов в бланк замеров. Об окончании регистрации он сообщает на пульт управления включением на 5...8 с тумблера "Измерение завершено" на своем рабочем месте. На каждом режиме студентами проводится измерение всех перечисленных в разд. 5 параметров.
4. Двигатель выводится на следующий режим работы и повторяется выполнение операций, перечисленных в п. 3.

В данной лабораторной работе испытание ТВД проводится на четырех режимах: взлетном, максимальном продолжительном и двух крейсерских.

5.2 Первичная обработка результатов измерений

Обработка результатов измерений проводится в следующей последовательности:

1. Определяется абсолютное значение частоты вращения

$$n = n_{\text{норм}} \frac{\bar{n}}{100}, \quad (1)$$

где \bar{n} — относительная частота вращения ротора в %, а

$$n_{\text{норм}} = 462,5 \text{ с}^{-1} = 27750 \text{ мин}^{-1}.$$

2. Вычисляются абсолютные температуры торможения в характерных сечениях:

$$T_i^* = t_i^* + 273,15 \text{ K}, \quad (2)$$

где t_i^* — измеренное значение температуры в °C.

3. Находится приведенный расход воздуха через двигатель

$$G_{\text{в пр}} = K_1 q(\lambda_{\text{в}}) = K_2 \pi(\lambda_{\text{в}}).$$

Здесь K_1 и K_2 — постоянные величины, а $q(\lambda_{\text{в}})$ и $\pi(\lambda_{\text{в}})$ — газодинамические функции приведенной скорости $\lambda_{\text{в}}$, так как

$$G_{\text{в}} = m F_{\text{в}} q(\lambda_{\text{в}}) \frac{P_{\text{в}}^*}{\sqrt{T_{\text{в}}^*}}, \quad \text{где } m = 40,4.$$

Учитывая, что

$$\pi(\lambda_{\text{в}}) = \frac{P_{\text{в}}}{P_{\text{в}}^*} = \frac{P_{\text{н}} - \Delta p_{\text{в}}}{P_{\text{н}}} = 1 - \frac{\Delta p_{\text{в}}}{P_{\text{н}}},$$

можно записать

$$G_{\text{в пр}} = f\left(\frac{\Delta p_{\text{в}}}{P_{\text{н}}}\right) \quad (3)$$

где $\Delta p_{\text{в}}$ — перепад между давлениями торможения и статическим на входе в компрессор.

Зависимость (3) для двигателя ДГ-4М, позволяющая определять $G_{\text{в пр}}$ по отношению $\frac{\Delta p_{\text{в}}}{P_{\text{н}}}$, приведена на рис. 4.

При расчете безразмерной величины $\frac{\Delta p_{\text{в}}}{P_{\text{н}}}$ следует пользоваться соотношением между единицами давления 1 мм рт. ст. = 13,6 мм в. ст.

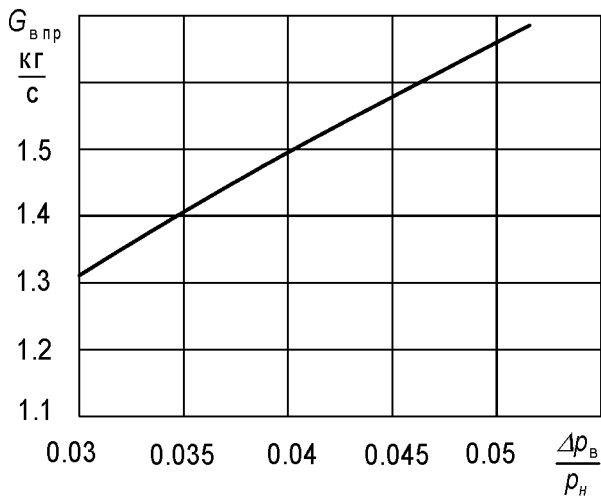


Рис. 4. Градуировочный график приведенного расхода воздуха через двигатель

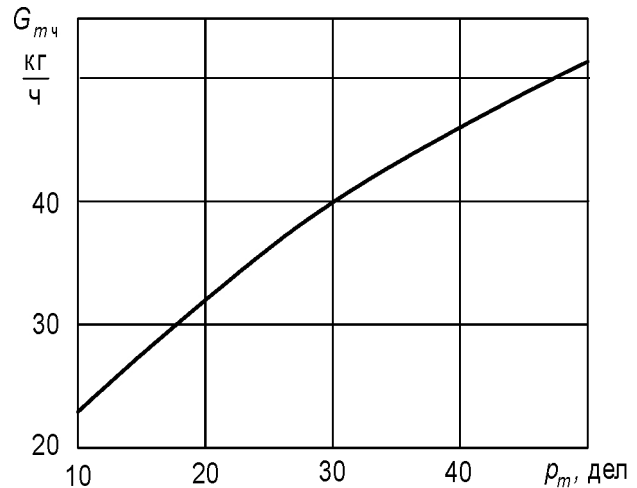


Рис. 5. Градуировочная зависимость для определения расхода топлива

4. Определяется расход топлива:

$$G_m = \frac{V_{ш} \rho_m}{\tau}, \frac{\text{кг}}{\text{с}}, \quad G_{mч} = \frac{3600 V_{ш} \rho_m}{\tau}, \frac{\text{кг}}{\text{ч}}, \quad (4)$$

где $V_{ш}$ — мерный объем штихпробера ($V_{ш} = 1,14 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$);

ρ_m — плотность топлива в $\text{кг}/\text{м}^3$;

τ — время выработки мерного объема штихпробера в с.

Плотность топлива ρ_m измеряется денсиметром, или определяется по зависимости: $\rho_m = 790 - 0,7t_m$, где t_m — температура топлива, принимается равной минимальному за время эксперимента измеренному значению температуры t_B .

Расход топлива $G_{mч}$ можно также определить по градуировочной зависимости (см. рис. 5) с помощью измеренных значений давления топлива перед форсункой p_m .

5. Рассчитывается крутящий момент на валу винта:

$$M_{кр} = Fl, \quad (5)$$

где F — сила, возникающая на статоре тормозного устройства;

l — плечо действия силы ($l = 0,3335 \text{ м}$).

Величина силы F определяется с помощью градуировочного графика (рис. 6) по значению частоты сигнала f в кГц, снимаемого с вибрационно-частотного первичного преобразователя силы, или по аппроксимирующей этот график зависимости

$$F = (476,19f - 1485,23) \cdot 10^{-3}, \text{ кН} \quad (6)$$

6. Вычисляется мощность, затрачиваемая на вращение винта ТВД:

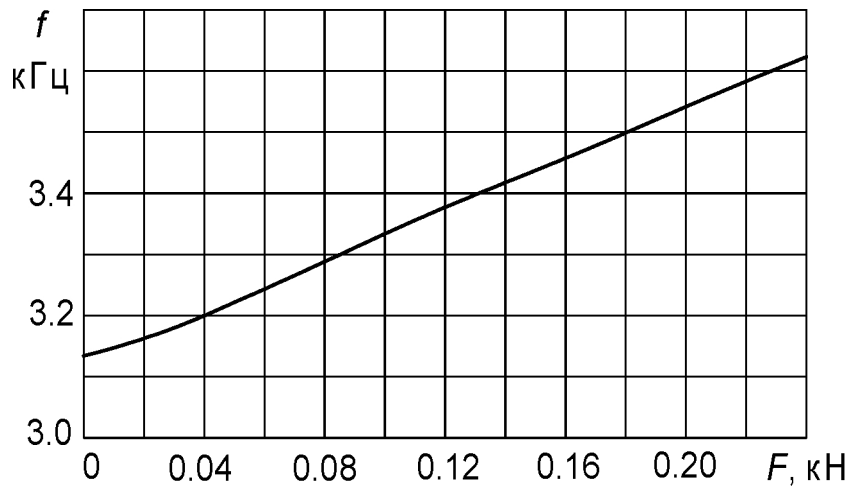


Рис. 6. Градуировочный график первичного преобразователя силы ДДВ

$$N_{\text{в}} = \frac{M_{\text{кр}} 2\pi n}{i}, \quad (7)$$

где $M_{\text{кр}}$ — крутящий момент на валу винта;

n — частота вращения ротора двигателя;

i — передаточное число редуктора воздушного винта. У ТВД ДГ-4М $i = 4,625$.

7. Находится условная мощность реактивной струи ТВД при $V_{\text{п}} = 0$:

$$N_{\text{рс}} = \omega P_{\text{рс}}, \quad \text{кВт}, \quad (8)$$

где $P_{\text{рс}}$ — тяга реактивной струи двигателя в кН,

ω — коэффициент пересчета реактивной силы в мощность на валу винта, обеспечивающую ту же величину тяги.

При испытаниях ТВД на стенде ($V_{\text{п}} = 0, H = 0$) для тянущих самолетных винтов

принимают $\omega = 68,2 \frac{\text{кВт}}{\text{кН}}$ (соответствует $\omega = 0,91 \frac{\text{л.с.}}{\text{кгс}}$ в системе МКГСС).

8. Определяется эквивалентная мощность ТВД:

$$N_{\text{э}} = N_{\text{в}} + N_{\text{рс}}. \quad (9)$$

5.3 Приведение параметров двигателя к стандартным атмосферным условиям и построение стендовой дроссельной характеристики

Для сравнения результатов различных испытаний параметры двигателя пересчитываются на стандартные атмосферные условия (САУ). За САУ принимаются

$$p_{\text{н}_0} = 101,325 \text{ кПа} = 760 \text{ мм. рт. ст.}, \quad T_{\text{н}_0} = 288,16 \text{ К}.$$

Формулы приведения параметров ТВД, полученные с использованием теории подобия, имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned}
 n_{\text{пр}} &= n_{\text{изм}} \sqrt{\frac{288,16}{T_H} \bar{n}}; & P_{\text{пр}} &= P_{\text{изм}} \frac{101,33}{P_H} \bar{P}; \\
 T_{\text{пр}}^* &= T_{\text{изм}}^* \frac{288,16}{T_H} \bar{T}; \\
 G_{\text{в пр}} &= G_{\text{в изм}} \frac{101,33}{P_H} \sqrt{\frac{T_H}{288,16}} \bar{G}_{\text{в}}; \\
 G_{\text{т пр}} &= G_{\text{т изм}} \frac{101,33}{P_H} \sqrt{\frac{288,16}{T_H}} \bar{G}_{\text{т}}; \\
 N_{\text{пр}} &= N_{\text{изм}} \frac{101,33}{P_H} \sqrt{\frac{288,16}{T_H}} \bar{N},
 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где $\bar{n}, \bar{P}, \bar{T}, \bar{G}$ и др. — поправочные коэффициенты, учитывающие отличие реального рабочего процесса в ТВД от идеального, рассматриваемого в теории подобия при выводе этих формул.

Отклонения от условий полного подобия вызываются изменением теплоемкости газа, газовой постоянной, числа Re, геометрических искажений в проточной части и других параметров, принятых при выводе формул приведения постоянными. Чем значительнее изменение этих параметров, тем больше величина поправочных коэффициентов.

Опыт эксплуатации и исследований показывает, что для большинства современных ТВД наиболее значительна величина поправки \bar{G}_m . Этот поправочный коэффициент может быть определен для данного двигателя расчетным путем. Зависимость $\bar{G}_m = f(t_H, \bar{N})$ для характерных режимов работы ТВД ДГ-4М представлена на рис. 7.

По экспериментальным параметрам ТВД на всех режимах работы, приведенным к САУ с помощью формул (10), каждым студентом на миллиметровке строится дроссельная характеристика. Пример построения такой характеристики показан на рис. 8.

5.4 Определение нормальных значений параметров ТВД

Стендовая дроссельная характеристика ТВД ДГ-4М построена в соответствии с ТУ при $n_{\text{пр}} = n_{\text{норм}} = \text{const}$ для всех режимов.

Исходя из заданных в ТУ нормальных значений мощности $N_{\text{э норм}}$ на исследуемых режимах, со стендовой дроссельной характеристики при $N_{\text{э пр}} = N_{\text{э норм}}$ снимаются нормальные значения других параметров двигателя. В лабораторной работе нормальные значения параметров необходимо определить для взлетного, максимального продолжительного и крейсерского ($N_{\text{кр}} = 0,7N_{\text{max пр}}$) режимов работы.

Схема определения нормальных значений параметров ТВД показана на рис. 3.

6 Расчет нормальных значений температуры газа перед турбиной

Непосредственно измерение температуры газа перед турбиной $T_{\text{г}}^*$ у большинства ТВД не производится. Для оценки и контроля её предельных значений в процессе эксплуатации часто пользуются результатами измерений температуры газа за турбиной $T_{\text{т}}^*$.

Величину температуры $T_{\text{г норм}}^*$ на конкретных экземплярах ТВД можно вычислить по одному из трех следующих методов:

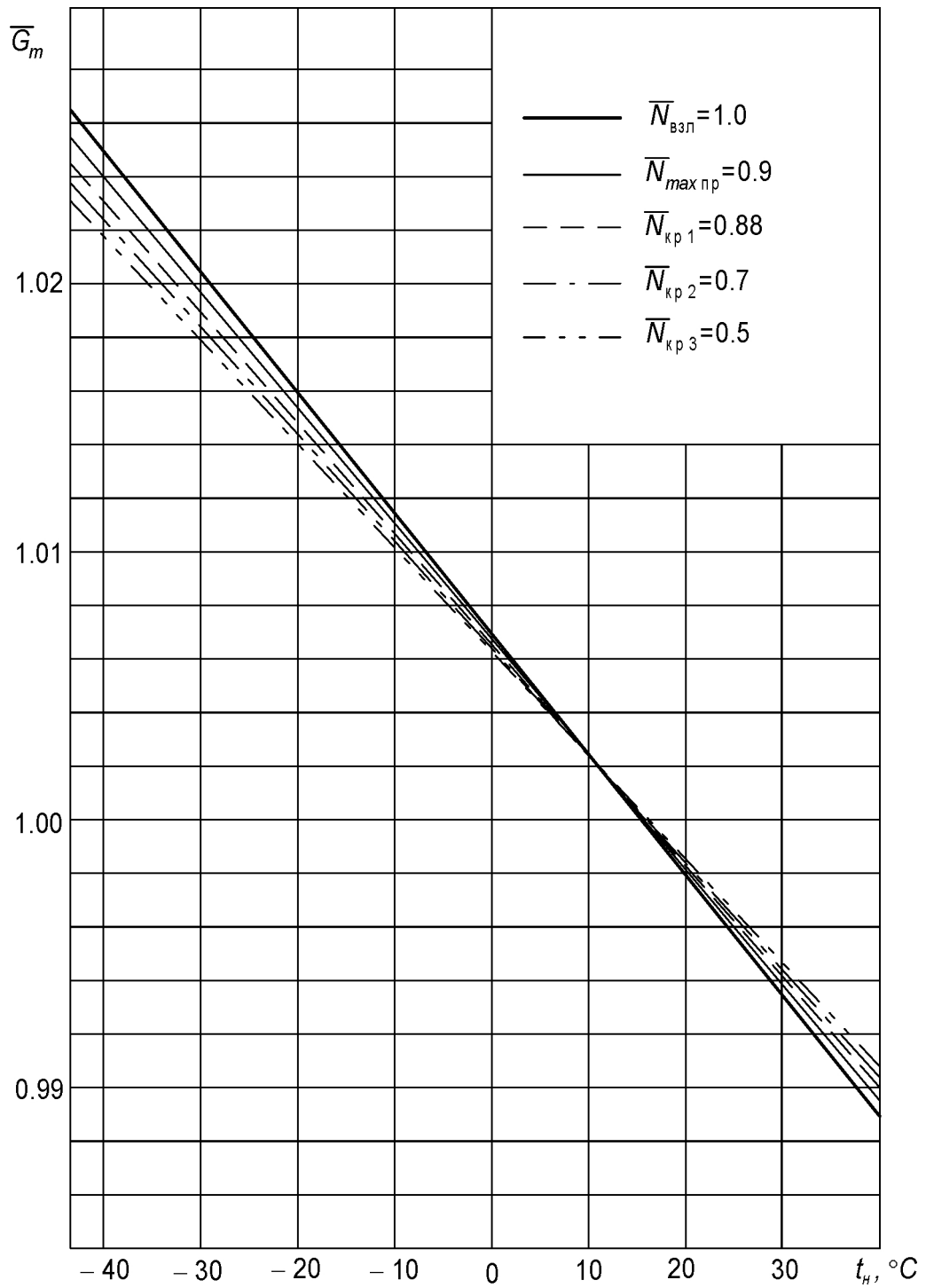


Рис. 7. Зависимость коэффициента \bar{G}_m от t_n и режима работы ГТД ДГ-4М

1. По уравнению теплового баланса

$$i_{\Gamma}^* = i_{\text{к}}^* + \frac{G_m H_u \eta_{\Gamma}}{G_{\text{в}} \vartheta_{\text{охл}} K_{\Gamma} + G_m}. \quad (11)$$

Чтобы рассчитать величину $T_{\Gamma \text{ норм}}^*$ по этому уравнению, необходимо определить $T_{\text{к норм}}^*$, $G_{m \text{ норм}}$, $G_{\text{в норм}}$, а также с достаточной достоверностью знать величины коэффициентов η_{Γ} , $\vartheta_{\text{охл}}$ и поправочного коэффициента K_{Γ} (см. [3] с. 74).

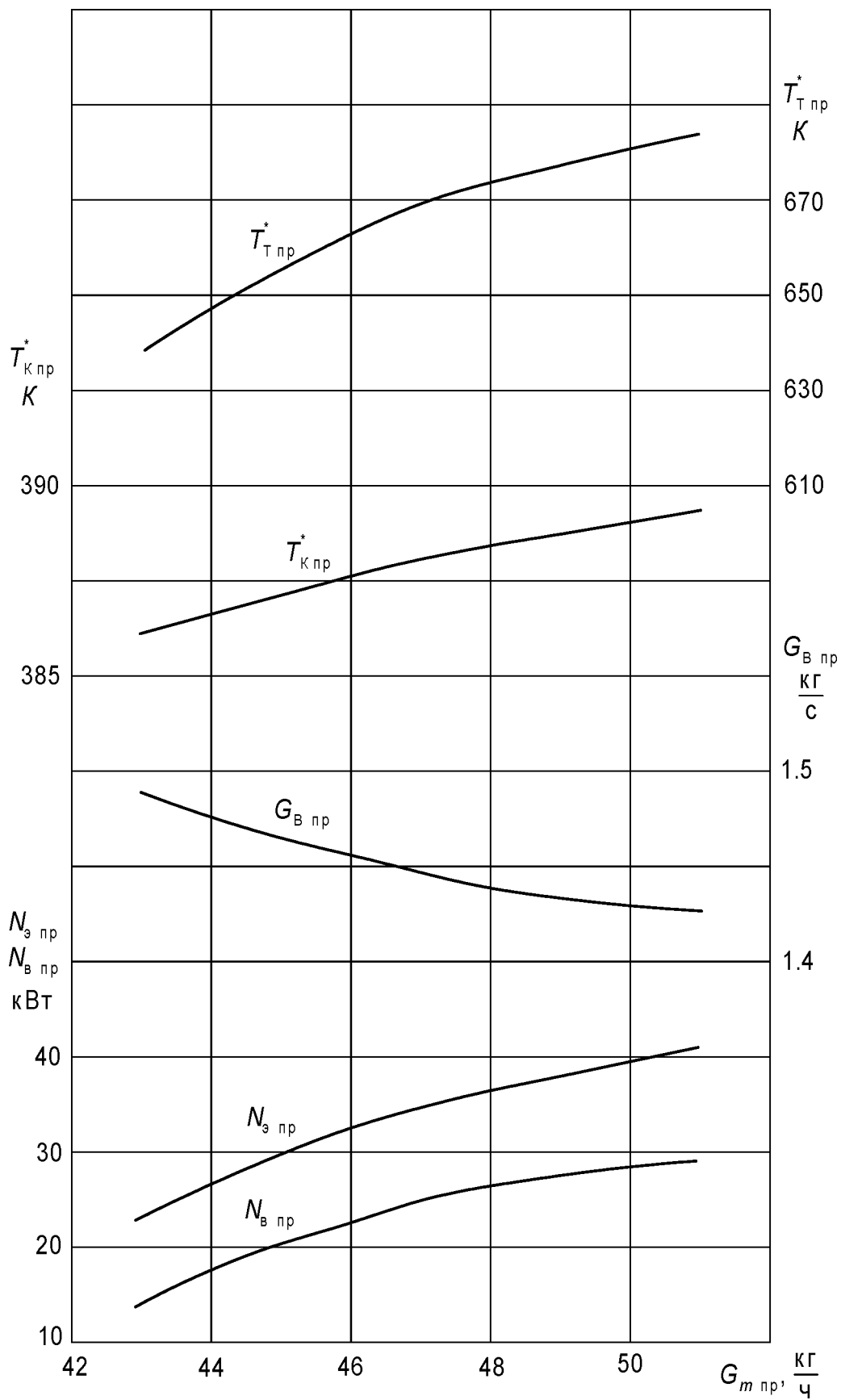


Рис. 8. Стендовая дроссельная характеристика ТВД ДГ-4М при $n_{пр} = 27750$ об/мин

2. По уравнению мощностного баланса

$$i_{\Gamma}^* = i_{\Gamma}^* + \frac{G_{\text{В}}(i_{\text{К}}^* - i_{\text{В}}^*) + N_{\text{В}}}{(G_{\text{В}}g_{\text{охл}} + G_{\text{м}})\eta_{\text{М}}}. \quad (12)$$

Для вычисления $T_{\Gamma \text{ норм}}^*$ следует определить $T_{\text{К норм}}^*$, $T_{\Gamma \text{ норм}}^*$, $G_{\text{В норм}}$, и с требуемой достоверностью знать величину коэффициентов $g_{\text{охл}}$ и $\eta_{\text{М}}$.

3. По уравнению баланса расходов

$$T_{\Gamma}^* = \left[\frac{p_{\text{К}}^* \sigma_{\text{Кс}} A_{\Gamma}}{G_{\text{В}} \left(g_{\text{охл}} + \frac{G_{\text{м}}}{G_{\text{В}}} \right)} \right]^2. \quad (13)$$

Рассчитать $T_{\Gamma \text{ норм}}^*$ по данному уравнению можно, определив $p_{\text{К норм}}^*$, $G_{\text{В норм}}$, $G_{\text{м норм}}$, и зная с достаточной достоверностью величины коэффициентов $\sigma_{\text{Кс}}$, $g_{\text{охл}}$ и пропускную способность турбины $A_{\Gamma} = \mu F_{\text{са}} \sigma_{\text{са}} q(\lambda_{\text{са}})$.

Основной задачей экспериментального определения температуры $T_{\Gamma \text{ норм}}^*$ является достижение согласования значений T_{Γ}^* , полученным по этим трем балансным уравнениям.

В лабораторной работе рекомендуется рассчитать нормальное значение температуры газа перед турбиной $T_{\Gamma \text{ норм}}^*$ по уравнению мощностного баланса (12) на взлетном режиме работы ТВД при $g_{\text{охл}} = 0,985$ и $\eta_{\text{М}} = 0,99$.

Величины энтальпий воздуха $i_{\text{В}}^*$ и $i_{\text{К}}^*$, а также газа i_{Γ}^* и i_{Γ}^* определяются с помощью $\pi - i - T$ диаграмм для сухого воздуха и продуктов сгорания (при $\alpha = 4$) соответственно по нормальным значениям температур торможения в указанных сечениях (см. [3], с.91, 92 и 108, 109). При этом следует пользоваться следующей связью между единицами работы и энергии: 1 кал = 4,187 Дж.

7 Отчет по работе

К отчету по лабораторной работе должны быть представлены каждым студентом следующие материалы:

1. Полностью оформленный бланк замеров с результатами испытания, номером группы, фамилиями, инициалами и подписями студентов, проводивших данные измерения.
2. Качественно оформленный протокол испытания с представленными в виде таблиц результатами всех расчетов и величинами нормальных значений параметров двигателя на взлетном, максимальном продолжительном ($N_{\text{max пр}} = 0,9N_{\text{взл}}$) и крейсерском ($N_{\text{кр}} = 0,7N_{\text{max пр}}$) режимах работы (см. приложение 1). Протокол подписывается студентом, оформившим его.
3. График стендовой дроссельной характеристики ТВД ДГ-4М, выполненный на миллиметровке форматом 210×297. Характеристика строится карандашом с применением лекал. Рекомендуемые масштабы и расположение кривых показаны на рис. 8. На графике должны быть фамилия, инициалы и группа студента, а также его подпись.

Зачет по лабораторной работе ставится при наличии у студентов перечисленных выше материалов по результатам собеседования (контрольные вопросы для подготовки к зачету смотри в приложении 2).

Список литературы

1. Солохин Э.Л. Испытания авиационных воздушно-реактивных двигателей. — М.: Машиностроение, 1975. — 356 с.
2. Дорофеев В.М., Левин В.Я. Испытания воздушно-реактивных двигателей. — М.: Оборонгиз, 1961. — 220 с.
3. Термогазодинамический расчет газотурбинных силовых установок./Дорофеев В.М., Маслов В.Г., Первышин Н.В. и др. — М.: Машиностроение, 1973. — 144 с.
4. Зайдель А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений. — Л.: Наука, 1975. — 108 с.
5. Нечаев Ю.Н., Федоров Р.М. Теория авиационных газотурбинных двигателей. Ч.2. — М.: Машиностроение, 1978. — 336 с.
6. Испытания воздушно-реактивных двигателей/А.Я. Черкез, И.И. Онищик, Е.М. Таран и др.; Под общей ред. А.Я. Черкеза. — М.: Машиностроение, 1992. — 304 с.

Приложение 1

Пример заполнения протокола испытаний
к лабораторной работе №2 (к курсу "Испытание двигателей")

1. Задание. Снять стендовую дроссельную характеристику и определить нормальные значения параметров ТВД ДГ-4М на взлетном, максимальном продолжительном и крейсерском режимах.

По результатам эксперимента построить графики:

$$N_{э пр}, N_{в пр}, G_{в пр}, T_{к пр}^*, T_{г пр}^* = f(G_{м пр}).$$

2. Краткая методика эксперимента: описываются последовательность основных этапов эксперимента и проводимые измерения.
3. Экспериментальная установка и её данные: кратко описываются последовательность основных этапов эксперимента и проводимые измерения.

4. Протокол №1-2 ИД

Топливо: ТС-1, $\rho_m = 780$ кг/м³.

Масло: МК-8.

5. Атмосферные условия: $p_H = 754$ мм рт. ст., $t_H = ^\circ C$

6. Таблицы протокола

6.1 Результаты измерений

Номер режима	\bar{n}	t_B^*	t_K^*	$t_T^{*'}$	$t_T^{*''}$	$t_T^{*'''}$	Δp_B	P_{pc}	P_m	τ	f
	%	$^\circ C$	$^\circ C$	$^\circ C$	$^\circ C$	$^\circ C$	мм в. ст.	кГс	дел.	с	кГц
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2	99,04	9,5	106,5	327	330	340	200/205	16,3	34,7	75,9	3,247

6.2 Первичная обработка результатов измерений

n	T_B^*	T_K^*	T_T^*	$\frac{\Delta p_B}{P_H}$	$G_{в пр}$	F	N_B	P_{pc}	N_{pc}	$N_э$
c^{-1}	K	K	K	–	$\frac{кг}{с}$	кН	кВт	кН	кВт	кВт
14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
458,06	282,7	379,7	600,9	0,03950	1,487	0,061	12,65	0,16	10,92	23,57

6.3 Приведение параметров к САУ

G_m	G_m	$n_{пр}$	$T_{в пр}^*$	$T_{к пр}^*$	$T_{г пр}^*$	$G_{в пр}$	\bar{G}_m	$G_{м пр}$	$N_{в пр}$	$N_{э пр}$
$\frac{кг}{ч}$	$\frac{кг}{ч}$	c^{-1}	K	K	K	$\frac{кг}{с}$	–	$\frac{кг}{ч}$	кВт	кВт
26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
43,30	42,18	462,5	288,15	387,0	612,5	1,487	1,0025	43,03	12,87	23,99

6.4 Определение нормальных значений параметров двигателя

Режим	$N_{э норм}$	$G_{м норм}$	$G_{в норм}$	$T_{к норм}^*$	$T_{г норм}^*$	$N_{в норм}$
		кВт	$\frac{кг}{ч}$	$\frac{кг}{с}$	K	K
38	39	40	41	42	43	44
Взл.	42,0	50,80	1,454	391,3	668	30,3

6.5 Расчет нормального значения T_r^* на взлетном режиме

i_B^*	i_K^*	i_T^*	$G_{m \text{ норм}}$	i_r^*	$T_{r \text{ норм}}^*$
$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{\text{кг}}{\text{с}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	K
46	47	48	49	50	51
288,2	392,0	689,5	0,01411	816,07	782,6

7. Схема установки и основные формулы. По указанию преподавателя выполняются схемы измерения крутящего момента на валу воздушного винта и определения нормальных значений параметров ТВД $n_{пр} = n_{норм} = const$, приведены основные расчетные формулы.

Приложение 2

Контрольные вопросы для подготовки к отчету по лабораторной работе

1. Насколько C_3 и T_r^* ТВД на базе ДГ-4М отличаются от значений этих параметров, характерных для современных ТВД и почему?
2. Что называют нормальными значениями параметров ТВД?
3. Какова методика экспериментального определения нормальных значений параметров ТВД в данной лабораторной работе?
4. Дайте определение стендовой дроссельной характеристики ТВД ДГ-4М.
5. Какова методика снятия стендовой дроссельной характеристики ТВД ДГ-4М?
6. Что такое испытание ТВД на подобном режиме и каким образом это можно обеспечить при различных T_H ?
7. Изменением каких факторов пренебрегают в теории подобия при выводе формул приведения параметров ТВД?
8. Какова номенклатура основных режимов работы ТВД и их характеристик?
9. Какой метод измерения крутящего момента на валу воздушного винта применен в лабораторной работе, его преимущества и недостатки в сравнении с другими методами?
10. Каким образом у испытываемого ТВД ДГ-4М изменялась величина поглощаемой с вала воздушного винта мощности и как определялась эквивалентная мощность N_3 ?
11. Измерение каких параметров необходимо провести при испытании ТВД для расчета температуры T_r^* по уравнению теплового баланса?
12. Какие параметры следует измерить при испытании ТВД и величины каких коэффициентов необходимо знать для расчета температуры T_r^* по уравнению мощностного баланса?
13. Какие виды погрешностей измерений имеют место при испытании ГТД?
14. Какие методы исключения систематических погрешностей измерения и промахов применяются при стендовых испытаниях ГТД?

Для подготовки к этой лабораторной работе требуется самостоятельная проработка лекций и учебника [1]: глава III, § 3, глава IV, § 12, глава V, § 2 и 3.

Содержание

1	Порядок проведения работы	3
2	Краткие сведения о режимах работы и характеристиках ТВД.....	4
3	Объект испытания	5
4	Особенности испытательного стенда, измеряемые параметры и схема препарирования двигателя	6
5	Методика экспериментального определения нормальных значений параметров ТВД.....	8
5.1	Порядок проведения испытания.....	9
5.2	Первичная обработка результатов измерений	11
5.3	Приведение параметров двигателя к стандартным атмосферным условиям и построение стендовой дроссельной характеристики	13
5.4	Определение нормальных значений параметров ТВД.....	14
6	Расчет нормальных значений температуры газа перед	14
	турбиной.....	14
7	Отчет по работе.....	17
	Список литературы	18
	Приложение 1	19
	Приложение 2	21

Составитель: Владимир Алексеевич Григорьев

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ НОРМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ
ПАРАМЕТРОВ ТУРБОВИНТОВОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Методические указания к лабораторной работе

Лицензия ЛР

Подписано в печать

Формат

Усл. печ. л.

Тираж

Самарский государственный аэрокосмический университет имени С.П.Королева
443086. Самара, Московское шоссе, 34

ИПО Самарского государственного аэрокосмического университета. 443001.
Самара, Молодогвардейская, 151