

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
"САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕР-
СИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)" (СГАУ)

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ
НАГРУЗОЧНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

САМАРА 2014

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
"САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)"
(СГАУ)

В.А. ГРИГОРЬЕВ, П.Г. ЗУБКОВ, Д.С. КАЛАБУХОВ

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ
НАГРУЗОЧНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Печатаются по решению редакционно-издательского совета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)» в качестве методических указаний к лабораторной работе

САМАРА
Издательство СГАУ
2014

УДК 629.7.036, 018(075)

Рецензент: д.т.н., проф. В.А. Зрелов

Составители: В.А.Григорьев, П.Г.Зубков, Д.С. Калабухов

Григорьев В.А., Зубков П.Г., Калабухов Д.С.

Экспериментальное определение нагрузочных характеристик вспомогательного газотурбинного двигателя: метод. указания к лаб. работе. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2014.- 32 с.

Методические указания к лабораторной работе знакомят студентов с методикой определения нагрузочной характеристики классического турбовинтового газотурбинного двигателя, выполненного на базе вспомогательного газотурбинного двигателя при испытаниях на режимах, подобных его работе в стандартных атмосферных условиях.

Предназначены для студентов, обучающихся по специальности 24.05.02. «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» при изучении курсов «Испытания и обеспечение надежности авиационных двигателей и энергетических установок» и «Экспериментальные исследования авиационных двигателей».

Подготовлены на базе лабораторной работы, поставленной В.А. Григорьевым, П.Г. Зубковым и В.Г. Масловым.

Оглавление

1 ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ	6
2 КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О РЕЖИМАХ РАБОТЫ	7
И ХАРАКТЕРИСТИКАХ ТВД	7
4 ОСОБЕННОСТИ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА, ИЗМЕРЯЕМЫЕ	11
ПАРАМЕТРЫ И СХЕМА ПРЕПАРИРОВАНИЯ ДВИГАТЕЛЯ	11
5 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ	17
НАГРУЗОЧНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТВД	17
5.1 Порядок проведения испытания	17
5.3 Построение стендовой нагрузочной характеристики	25
6 ОПРЕДЕЛЕНИЕ НОРМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ТВД	26
7 ОТЧЁТ ПО РАБОТЕ	29
Библиографический список	30
ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ	31
ПРИЛОЖЕНИЕ А	32
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	34

Цель работы: практическое овладение методикой определения нагрузочной характеристики одновального вспомогательного газотурбинного двигателя турбовинтового типа путём испытания в стендовых условиях на эксплуатационных режимах.

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

1. Овладение методикой экспериментального определения нагрузочной характеристики ТВД.
2. Изучение методов расчёта температуры газа перед турбиной ТВД по результатам испытаний.
3. Приобретение практических навыков проведения стендовых испытаний ТВД.

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 на базе турбовального ВГТД.
3. Изучение техники безопасности при работе на испытательном стенде.
4. Ознакомление студентов, участвующих в проведении эксперимента, с их рабочими местами.
5. Уточнение на каждом рабочем месте методики проведения испытания ТВД.
6. Снятие экспериментальной нагрузочной характеристики ТВД.
7. Обработка результатов эксперимента, построение стендовой нагрузочной характеристики ТВД.
8. Определение нормальных значений параметров ТВД на взлётном, максимальном продолжительном и крейсерских режимах работы.
9. Расчёт температуры газа перед турбиной ТВД по результатам испытания.
10. Оформление и сдача отчёта по лабораторной работе.

Работа проводится в лаборатории комплексных исследований (корпус 11, ком. 125) бригадами по 5...7 человек (студенческая подгруппа разбивается на две бригады). Каждый студент обязан до прихода на лабораторную работу изучить дан-

ное 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 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 ВГТД работают в широком диапазоне режимов, обеспечивающих получение потребных для летательного аппарата величин тяг. Режим работы задаётся 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 $G_{m пр}$ или частоты вращения n и эквивалентной мощности N_e и т.п.

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

Нагрузочной характеристикой ТВД называют зависимость его основных данных и параметров (эквивалентной мощности, удельного расхода топлива и т.д.) от одного из параметров, характеризующих его нагрузку при постоянной частоте вращения ротора.

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. Поэтому нагрузочную 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 напряжённый режим предназначен для взлёта, достижения максимальной скорости полёта и выполнения различных манёвров.

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

Максимальный продолжительный - установившийся режим работы, характеризуемый 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 $N_{\max \text{ пр}} = (0,85 \dots 0,90)N_{\max}$. Максимальный продолжительный режим работы используется при наборе высоты полёта.

Крейсерские - установившиеся режимы работы, характеризуемые, 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 летательном аппарате. Мощность ТВД на этих режимах обычно составляет $N_{\text{кр}} = (0,4 \dots 0,85)N_{\max \text{ пр}}$.

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

3 ОБЪЕКТ ИСПЫТАНИЯ

Объектом испытания является ТВД, выполненный на базе вспомогательной силовой установки ДГ-4М. Двигатель предназначен для привода генератора переменного тока С-40.

Главные требования, предъявляемые к двигателям такого назначения:

- надёжный запуск в широком диапазоне изменения высотно-климатических условий (T_H от «минус» 50 до «плюс» 50°С, высоты H от 0 до 3 км, влажность до 95 %);
- поддержание постоянной частоты вращения ротора;
- возможность использования различных типов жидкого топлива (керосин, дизельное топливо, бензин).

Внешний вид и продольный разрез двигателя ДГ-4М показан на рисунках 1 и 2.

Двигатель ДГ-4М является одновальным и состоит из следующих узлов и систем:

- одноступенчатый центробежный компрессор (2);
- одноступенчатая радиально-осевая турбина (3);
- однофорсуночная камера сгорания тангенциального типа (4);
- одноступенчатый редуктор (1);
- система топливо питания, смазки и электрооборудования.

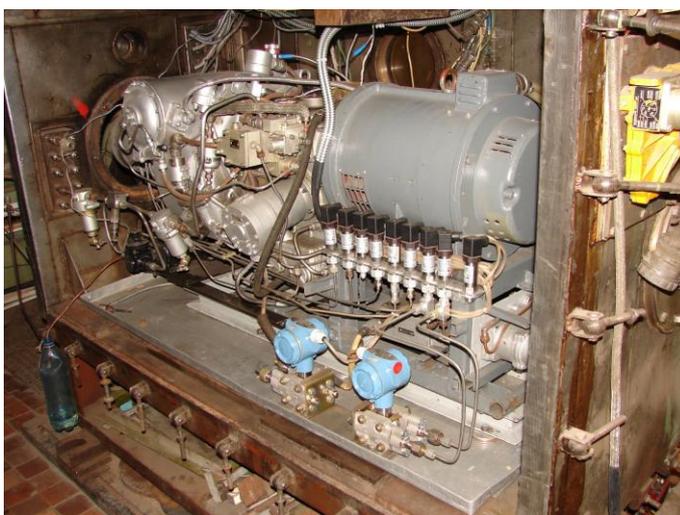
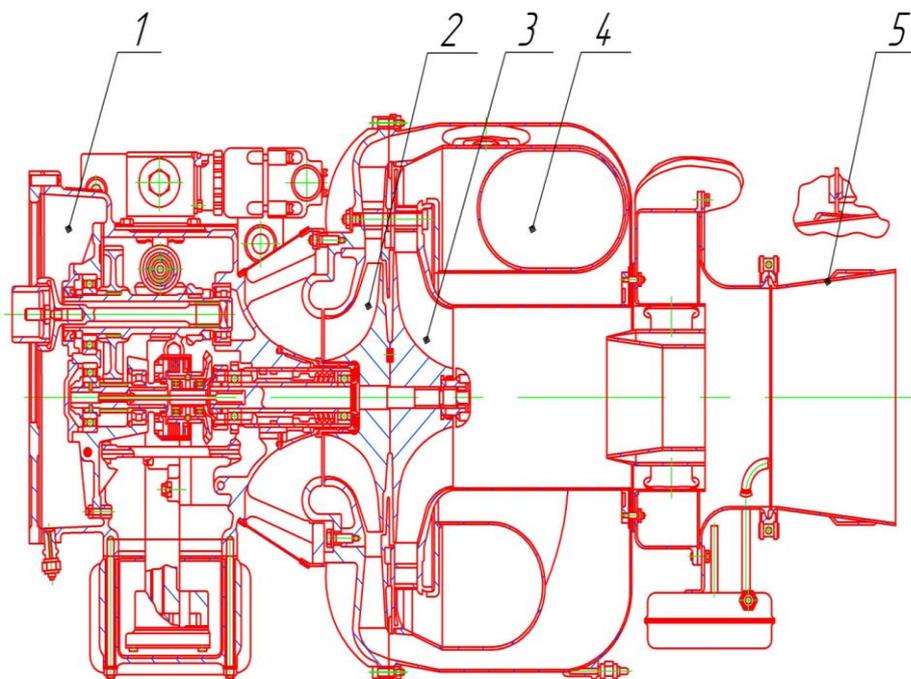


Рисунок 1 – Внешний вид двигателя ДГ-4М с генератором С-40

Двигатель крепится к генератору переходным фланцем. Вал двигателя соединяется с валом генератора С-40 муфтой с торсионом.

Однофорсуночная камера сгорания трубчатой конструкции расположена тангенциально к сопловому аппарату турбины. Частота вращения ротора двигателя на всех указанных выше режимах работы сохраняется постоянной и равной $462,5 \text{ с}^{-1}$.



1-редуктор; 2- компрессор; 3- турбина; 4- улитка газосборника; 5- сопло

Рисунок 2 – Продольный разрез двигателя ДГ-4М

Редуктор двигателя имеет передаточное число $i = 4,625$, поэтому частота вращения вала воздушного винта (выходного вала привода генератора) равна $n_{\text{норм}} = 100 \text{ с}^{-1}$. Вход воздуха в компрессор радиальный.

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

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 нагрузочной характеристики на различных режимах работы проводятся в лаборатории комплексных исследований малоразмерных ГТД в сложившихся атмосферных условиях на штатных эксплуатационных режимах.

Таблица 1 – Основные технические данные ТВД на базе ДГ-4М в сравнении с параметрами современных авиационных турбовинтовых двигателей

№ п/п	Двигатели	Фирма разработчик	Назначение двигателя	N_B	G_B	π_K^*	T_T^*	C_3
				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	GE H80	Дженерал Электрик	Легкий пассажирский самолет	588,4	3,72	6,7	1053	0,359
3	ТВД-1500Б	НПО «Сатурн»	Самолет местных воздушных линий	1028	2,5	11,7	1470	0,286
4	PW127M	Прайтт-Уитни	Самолет местных воздушных линий	2051	8	14,7	1390	0,209
5	TP400-D6	Европроп Интернэйшнл	Военно-транспортный самолет	7971	23	19	1700	0,238

Лаборатория входит в состав научно-образовательного центра газодинамических исследований (НОЦ ГДИ).

В процессе испытания на стенде измеряется большое количество параметров. Одни из них относятся к параметрам, характеризующим рабочий процесс двигателя, его соответствие заданным техническим условиям; другие позволяют контролировать и управлять стендовыми системами в процессе подготовки и проведения испытаний.

Основное требование, предъявляемое к системе измерения и регистрации – обеспечение необходимой точности измерений и соответствия ГОСТ.

Перечень измеряемых и контролируемых параметров при подготовке и проведении испытаний на экспериментальном стенде приведён в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры, измеряемые при подготовке и проведении испытаний

№	Измеряемые параметры	Единица измерения	Диапазон измерения	Погрешность	Датчик	Кол-во датчиков
1	Атмосферное давление	кПа	85...115	0,3	Sitrans P (серия Z)	1
2	Давление воздуха на входе в двигатель	кПа	65...115	0,3	Sitrans P (серия Z)	1
3	Давление воздуха за компрессором	кПа	0...320	0,3	Sitrans P (серия Z)	1
4	Давление газа за турбиной	кПа	0...160	0,3	Sitrans P (серия Z)	1
5	Давление газа на срезе сопла	кПа	0...140	0,3	Sitrans P (серия Z)	1
6	Давление топлива за насосом низкого давления	кПа	0...250	2	Sitrans P (серия Z)	1
7	Давление топлива перед форсункой	кПа	0...4000	0,5	Sitrans P (серия Z)	1
8	Давление масла в двигателе	кПа	0...450	2	Sitrans P (серия Z)	1
9	Перепад между давлением заторможенного потока и статистическим на входе в двигатель	кПа	0...10	0,3	Метран-150	1
10	Температура воздуха на входе в компрессор	К	223...323	0,5	Термопара типа Т-49 (ХК)	3
11	Температура воздуха за компрессором	К	273...350	1,5	Термопара типа Т-49 (ХК)	3

12	Температура газа за турбиной	К	273...1200	1,5	Термопара ХА	6
13	Температура газа на срезе сопла	К	273...1200	1,5	Термопара ХА	3
14	Температура топлива перед форсункой	К	223...323	1,5	Термопара ХК	1
15	Расход топлива	кг/с	0...0,02	0,5	Турбинный расходомер	1
16	Частота вращения ротора двигателя и ТДУ	с ⁻¹	0...500	2,5	ДТЭ-1	2
17	Напряжение генератора	В	0...250	0,5	И-508М, К-50	1
18	Ток генератора С-40	А	0...150	0,5	И-508М, К-50	1

На рис. 3 приведена схема препарирования газоздушного тракта ТВД ДГ-4М.

Отбор рабочего тела для измерения давления осуществляется комбинированным приемником статического и заторможенного давлений (сечение В-В, рис. 4, а) и приемниками давления торможения (сечения К-К, Г-Г, Т-Т, С-С, рис. 4, б).

Давление заторможенного потока измеряется с помощью тензометрических преобразователей SITRANS P серии Z. Чувствительным элементом служит мембрана с установленными на ней тонкопленочными тензорезисторами, соединенными в мостовую схему. Принцип действия основан на изменении сопротивления тензорезисторов за счет прогиба мембраны под действием давления окружающей среды. Изменение сопротивления приводит к разбалансу моста Уитсона, которое пропорционально измеряемому давлению.

Несколько иной способ измерения давления реализован в датчике Метран-150 (рис. 5), который позволяет определить перепад между давлением заторможенного потока и статическим на входе в двигатель.

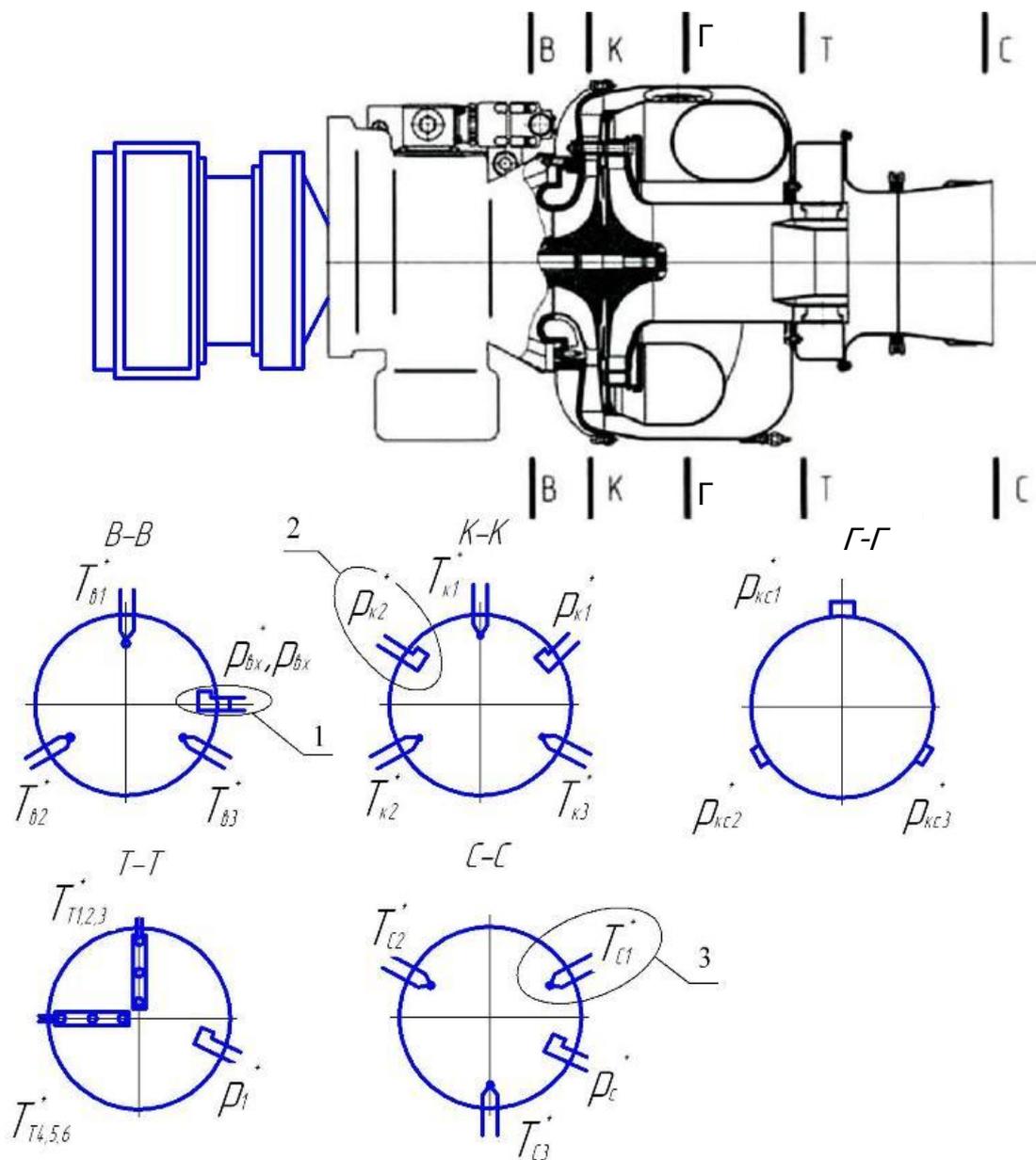


Рисунок 3 – Схема препарирования газоздушного тракта ТВД ДГ-4М

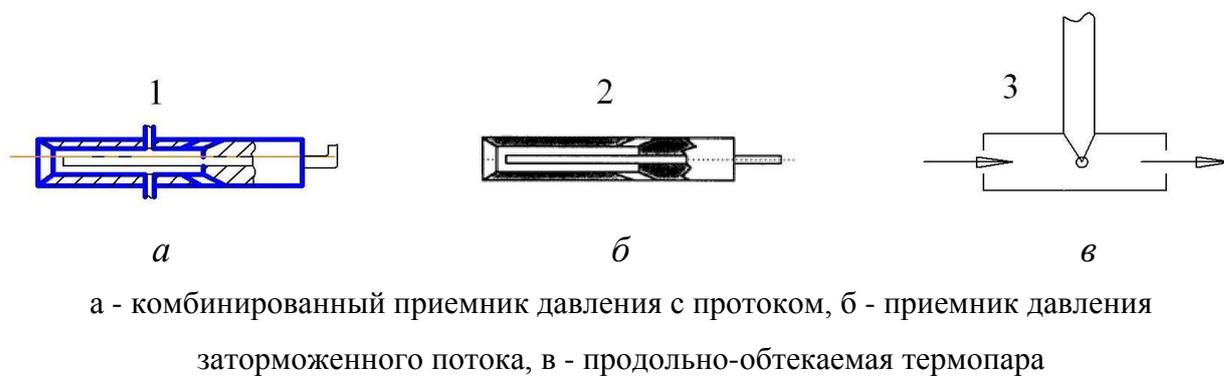


Рисунок 4 – Приемники давлений и термопара газоздушного тракта ТВД ДГ-4М

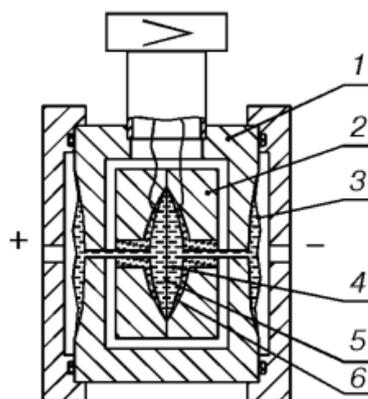


Рисунок 5 – Схема датчика давления Метран-150

Измерительный блок датчика состоит из корпуса 1 и емкостной измерительной ячейки 2. Емкостная ячейка изолирована механически, электрически и термически от измеряемой и окружающей сред. Измеряемое давление передается через разделительные мембраны 3 и разделительную жидкость 4 к измерительной мембране 5, расположенной в центре емкостной ячейки. Воздействие давления вызывает изменение положения измерительной мембраны 5, что приводит к появлению разности емкостей между измерительной мембраной и пластинами конденсатора 6, расположенным по обеим сторонам от измерительной мембраны. Разность емкостей измеряется аналого-цифровым преобразователем и преобразуется электронным преобразователем в выходной сигнал.

Температура заторможенного потока в сечениях двигателя, а также температура топлива перед форсунками измеряется при помощи хромель-копелевых и хромель-алюмелевых термопар (рис. 4, в), принцип действия которых основан на возникновении термо-ЭДС в цепи, состоящей из разнородных проводников. Термопара имеет горячий спай, который помещается в измеряемую среду и холодный спай, температура которого поддерживается постоянным за счет помещения холодного спая в термостат.

Измерение мощности, развиваемой двигателем, осуществляется по параметрам тока и напряжения приводного генератора С-40. Вырабатываемая генератором электрическая энергия подаётся на балластное сопротивление. Здесь она переходит в тепло, рассеиваемое в окружающую среду. Регулирование величины поглощае-

мой мощности (т.е. нагрузки на двигатель) осуществляется ступенчатым подключением секции балластного сопротивления (5 кВт, 10 кВт, 20 кВт, 20 кВт).

Измерение расхода топлива производится объёмным способом с использованием датчика турбинного расходомера ТДР-3-1-3 (рис. 6).

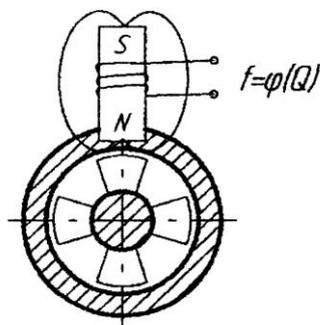


Рисунок 6 – Схема датчика расхода жидкости ТДР

Это датчик индукционного типа, представляющего собой магнит с обмоткой, импульсы в которой возникают при пересечении силовых магнитных линий обмотки лопастями турбины, установленной в потоке жидкости. Частота вращения турбины и, следовательно, частота электрических импульсов пропорциональна объёмному расходу жидкости, проходящей через датчик.

Определение расхода воздуха через двигатель проводится косвенным методом с использованием значений перепада давления между заторможенным потоком и статическим на входе в компрессор и градуировочного графика $G_{в пр} = f(\Delta p_{вх} / \rho_H)$ для двигателя ДГ-4М (рис. 13).

Частота вращения ротора измеряется с помощью датчика типа ДТЭ, который представляет собой низкочастотный (максимальная выходная частота 100 Гц) тахогенератор трехфазного тока. Вал тахогенератора связан с ротором двигателя через редуктор. Частота тока и выходное напряжение тахогенератора пропорционально измеряемой частоте вращения.

Измерение силы тока и напряжения осуществляется с помощью амперметра и вольтметра прибора К-50 с блоком измерительных трансформаторов И508М.

Запуск, испытание двигателя и управление системами стенда осуществляется с пульта управления, вид которого показан на рисунке 7. Регистрация параметров осуществляется автоматизированной системой, параметры отображаются на пульте оператора и на демонстрационных панелях.



Рисунок 7 – Пульта управления стандом для испытаний ТВД

5 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗОЧНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТВД

5.1 Порядок проведения испытания

Процесс испытания ДГ-4М в ТБК состоит из нескольких этапов:

- подготовка к запуску двигателя ДГ-4М;
- подготовка систем станда к испытаниям;
- запуск двигателя;
- проведение испытаний согласно заданной программе;
- «останов» двигателя и выключение систем станда;
- экспериментальное определение нагрузочной характеристики ДГ-4М.

Подготовка и проведение испытаний проводятся в следующей последовательности.

1) Включается питание всех систем стенда. На АРМ оператора вводится программа испытаний с заданными условиями. На мониторе АРМ оператора и на 4 демонстрационных панелях появляется основная экранная форма отображения параметров двигателя ДГ-4М. На АРМ оператора появляется также параметры систем стенда (см. рис. 8).

2) Подготовка к запуску двигателя ДГ-4М начинается при нажатии на виртуальную кнопку «Подготовка к запуску» после выбора режима управления «Ручной запуск». После выполнения всех операций по подготовке двигателя формируется сигнал «Двигатель к запуску готов».

3) Оператор нажимает виртуальную кнопку «Пуск». Происходит запуск и двигатель выводится на обороты «Холостого хода». Формируются сигналы «Режим» и «Двигатель и системы стенда к снятию характеристики готовы».

4) Снятие характеристики начинается после нажатия оператором виртуальной кнопки «Приступить к испытаниям». Контроллер с помощью специального устройства подаёт напряжение на обмотку возбуждения генератора С-40 и подключает внешнюю нагрузку 10 кВт. Частота вращения ротора двигателя поддерживается постоянным с помощью штатного насоса-регулятора СБ-54. Двигатель выводится на первый крейсерский режим.

5) После работы в течение 1-2 минут на данном режиме производится автоматизированное измерение параметров, их обработка и вывод на монитор АРМ оператора таблиц и видеокадров данного режима. Студенты наблюдают за параметрами на экранах демонстрационных моделей, записывают их, каждый на своем рабочем месте.

Например, параметры на входе в компрессор (сечение В-В) и параметры на входе в турбину (сечение Т-Т) показаны на рисунках 9 и 10. Через заданный по программе испытаний интервал времени оператор АРМ производит перевод двигателя ДГ-4М на 2-ой крейсерский режим. Далее включается нагрузка 20 кВт и повторяется выполнение операций, рассмотренных выше.

29.03.2012
13:59:11

Администратор

Выход

КВА

Турбина

Сопло

РУД

График

Сообщения

Выход

Двигатель ДГ4М

Общая

Вход

КВА

Турбина

Сопло

РУД

График

Сообщения

Выход

Подготовка к пуску

Останов

Параметры регулятора

Перевод в "Полуавтомат"

Программа испытаний ДХ

ЗАПУСК

Аварийный останов

Перевод в "Автомат"

Режим управления

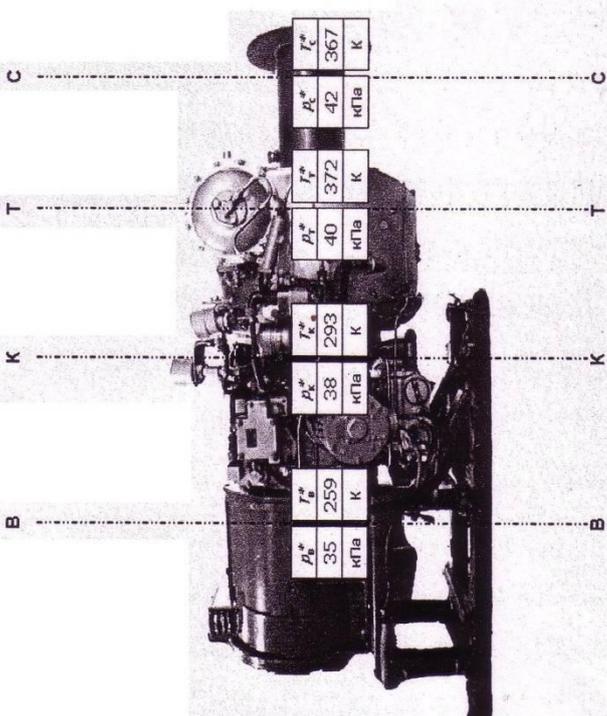
Автомат

Режим работы

Не готов к пуску

Параметры работы ДГ4М

Основные	2600	об/мин
G_B	---	кг/с
$\alpha_{руд}$	24,0	°
P	76,0	Н
$N_{эф}$	---	кВт
$W_{ген}$	---	кВт
$P_{усилн}$	77,0	Н
$U_{возб}$	21,0	В
$U_{борт}$	22,0	В
$P_{масла}$	47,0	кПа
$V_{вибр}$	32,0	м/с
$T_{т}^*$	---	К



Параметры стенда

Дополн.

$P_{ТДУ}$	---	кПа
$P_{ЭЖ}$	---	кПа
$P_{ТБК}$	---	кПа
$T_{ТБК}$	---	кПа
P_H	43,0	кПа

Топливо

G_m	51,0	кг/с
T_m	55,0	К
$P_{mнд}$	44,0	кПа
$P_{mф}$	49,0	кПа

1	29.03.2012	13:56:03	Пришло	Сигнал "Переключатель режима эжектора ДГ4М" неисправен
2	29.03.2012	13:56:03	Пришло	Сигнал "Переключатель включить эжектор ДГ4М" неисправен
3	29.03.2012	13:56:03	Пришло	Сигнал "Переключатель включить систему охлаждения ДГ4М" неисправен

Топливный насос НД	Режим: Автомат	Состояние: <input checked="" type="checkbox"/> Отключен
Топливный насос ВД	Режим: Автомат	Состояние: <input checked="" type="checkbox"/> Отключен
Маслонасос	Режим: Автомат	Состояние: <input checked="" type="checkbox"/> Включен
Топливная заслонка	Режим: Автомат	Состояние: <input checked="" type="checkbox"/> Открыта
Автомат запуска	Режим: Автомат	Состояние: <input checked="" type="checkbox"/> Включен

Квитировать

Рисунок 8 – Видеокадр на АРМ оператора

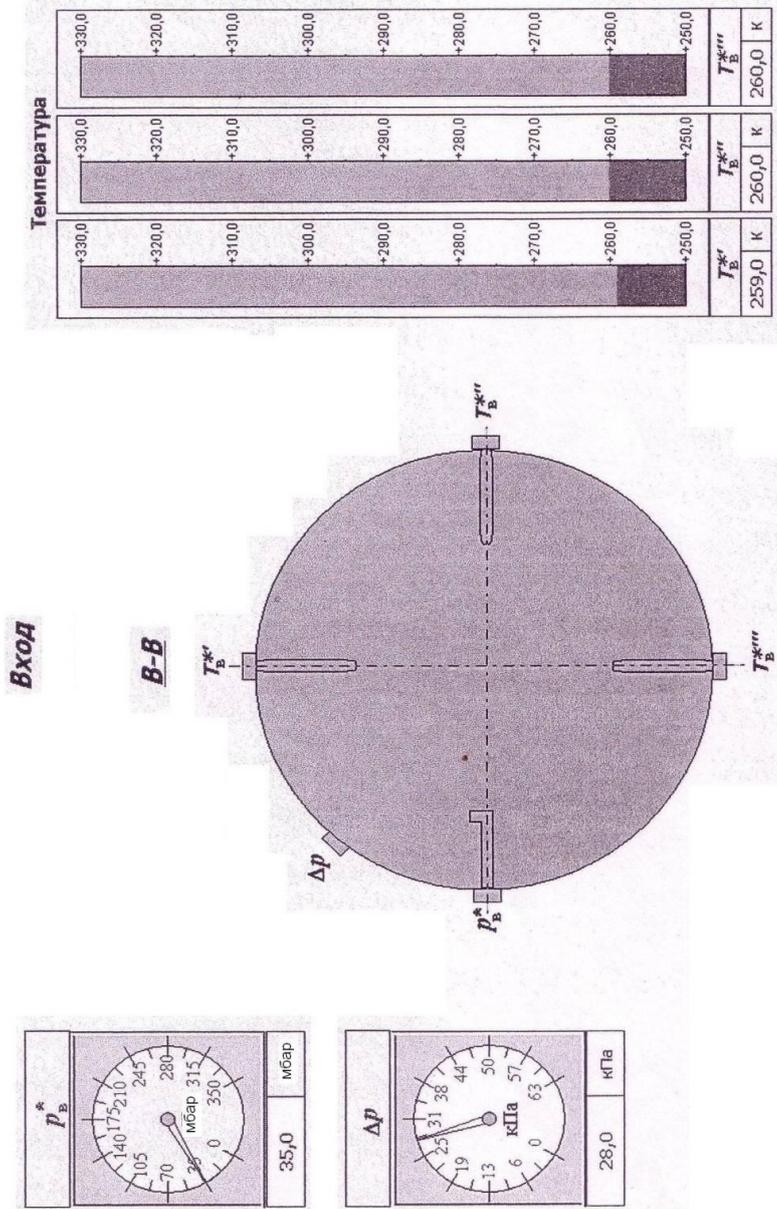


Рисунок 9 – Видеокадр на демонстрационной панели для регистрации параметров на входе в двигатель

29.03.2012
13:58:06

Общая

Вход

КВА

Турбина

Сопло

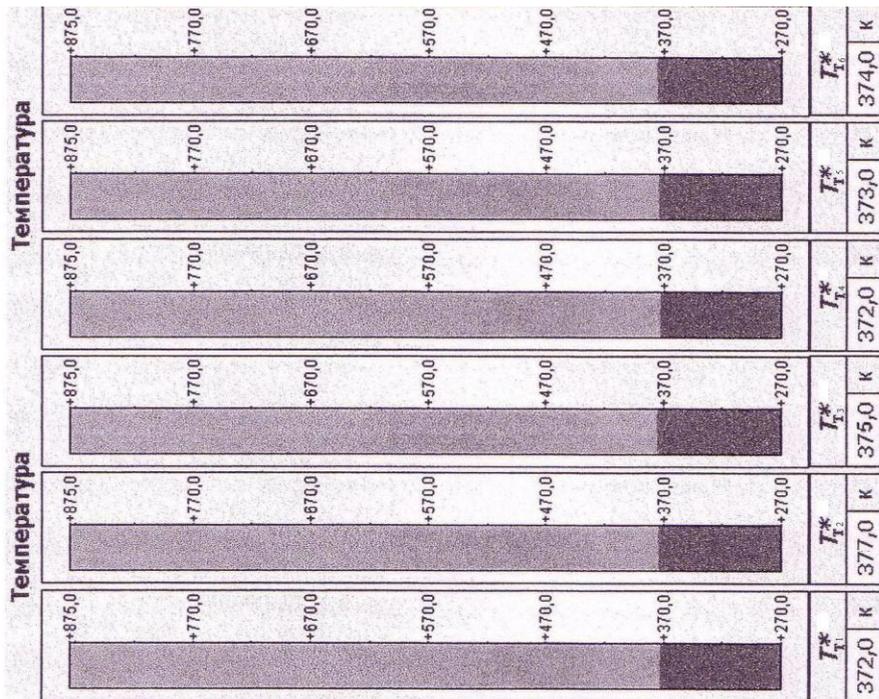
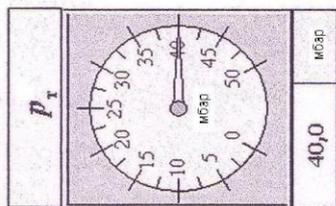
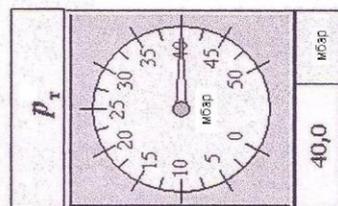
РУД

График

Сообщения

Выход

Турбина



$T-T$

$T_{T,1,2,3}^*$

p_T

$T_{T,4,5,6}^*$

p_T

$T_{T,7,8}^*$

Рисунок 10 - Видеоквадр на демонстрационной панели для регистрации параметров за турбиной

5.2 Первичная обработка результатов измерений

Обработка результатов измерений проводится в следующей последовательности:

1 Определяется абсолютное значение частоты вращения ротора двигателя, где

$$n = n_{\text{норм}} \frac{\bar{n}}{100}, \text{ с}^{-1} (\text{мин}^{-1}),$$

где \bar{n} - относительная частота вращения ротора в процентах, $\bar{n} = \sqrt{\frac{T_H}{288,16}} \cdot 100 \%$,

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

2 Определяются и переводятся из °С в К измеренные значения температуры торможения в характерных сечениях:

- $T_i^* = \frac{\sum t_i^*}{n_i} + 273,15 \text{ К}$, где T_i^* - измеренное значение температуры в °С в i -ой

точке;

- $T_H^* = t_H^* + 273,15 \text{ К}$;

- $T_B^* = \frac{t_{B1}^* + t_{B2}^* + t_{B3}^*}{3} + 273,15 \text{ К}$ - сечение В-В (см. рис.7);

- $T_K^* = \frac{t_{\hat{e}1}^* + t_{\hat{e}2}^* + t_{\hat{e}3}^*}{3} + 273,15 \text{ К}$ - сечение К-К;

- $T_T^* = \frac{t_{T1}^* + t_{T2}^* + t_{T3}^* + \dots + t_{T6}^*}{6} + 273,15 \text{ К}$ - сечение Т-Т;

- $T_C^* = t_C^* + 273,15 \text{ К}$ - сечение С-С.

• 3. Определяются абсолютные значения давлений по формуле:

- $p_i^* = p_H^* + p_{i \text{ изб}}^*$, Па.

• Абсолютное давление за компрессором:

- $p_K^* = p_H^* + p_{K \text{ изб}}^*$, Па,

где $p_{\hat{e} \text{ изб}}^*$ - избыточное давление за компрессором, измеренное в 3-х точках и газодинамически осреднённое.

Абсолютное давление на входе в компрессор

$$p_B^* = p_H^* + p_{B \text{ изб}}^*, \text{ Па.}$$

Абсолютное давление за турбиной:

$$p_T^* = p_H^* + p_{T \text{ изб}}^*, \text{ Па.}$$

Статическое давление за турбиной:

$$p_T = p_H + p_{T \text{ изб}}, \text{ Па.}$$

Абсолютное давление топлива перед форсункой:

$$p_m^* = p_H^* + p_{m \text{ изб}}^*, \text{ Па.}$$

4 Рассчитываем степень повышения давления в компрессоре по формуле $\pi_k^* = p_k^* / p_B^*$, но так как потери полного давления на входе в двигатель незначительны, то принимаем $p_B^* = p_H^*$, а π_k^* рассчитываем по формуле $\pi_k^* = p_k^* / p_H^*$.

5 Находится приведенный расход воздуха через двигатель:

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

Здесь K_1 и K_2 - постоянные величины, а $q(\lambda_B)$ и $\pi(\lambda_B)$ - газодинамические функции приведенной скорости λ_B , так как

$$G_B = m F_B q(\lambda_B) \frac{p_B^*}{\sqrt{T_B^*}}, \text{ где } m = 40,4.$$

Учитывая, что

$$\pi(\lambda_B) = \frac{p_B}{p_B^*} = \frac{p_H - \Delta p_B}{p_H} = 1 - \frac{\Delta p_B}{p_H}, \text{ можно записать}$$

$$G_{в \text{ пр}} = f\left(\frac{\Delta p_B}{p_H}\right), \text{ где } \Delta p_B - \text{ перепад между давлением торможения и статическим}$$

давлением на входе в компрессор.

Используя зависимость $G_{в \text{ пр}} = f\left(\frac{\Delta p_B}{p_H}\right)$, кг/с, представленную на рис. 11 для двигателя ДГ-4М, определим приведенный расход воздуха $G_{в \text{ пр}}$, кг/с.

Физический расход воздуха можно найти по формуле приведения

$$G_B = G_{в \text{ пр}} \frac{p_B^*}{101,33} \sqrt{\frac{288,16}{T_B^*}}.$$

6 Определение мощности двигателя.

При проведении испытания агрегатов питания мощность приводных малоразмерных ТВД типа ДГ-4М обычно определяется по параметрам генератора с учетом его КПД

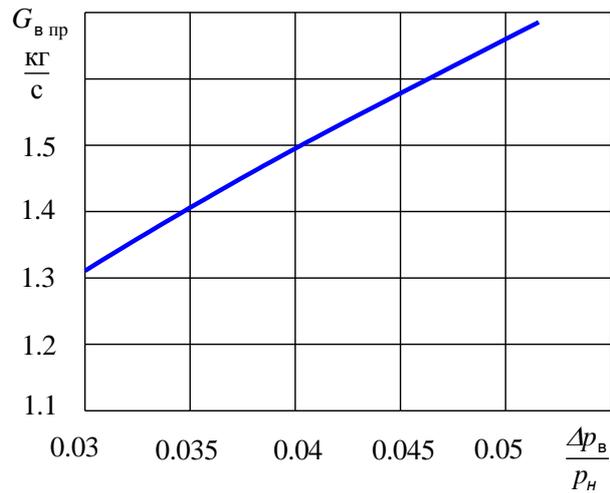


Рисунок 11 – Градуировочный график приведенного расхода воздуха через двигатель

$$N_{\text{в}} = \frac{N_{\text{ген}}}{\eta_{\text{ген}}},$$

где $N_{\text{ген}}$ – нагрузка снимаемая с генератора С-40

$$N_{\text{ген}} = 7,5 \cdot I \cdot U_{\text{л}} \cdot 10^{-3}, \text{ кВт},$$

где I - сила тока в амперах,

$U_{\text{л}}$ - линейное напряжение в вольтах,

$\eta_{\text{ген}}$ - КПД генератора.

КПД генератора в расчётах обычно принимается величиной постоянной и гарантируемой заводом изготовителем при номинальной нагрузке и постоянной частоте вращения. Для генератора С-40 значение $\eta_{\text{ген}} = 0,86$ при номинальной нагрузке $N_{\text{ген}} = 40$ кВт и $n = 100 \text{ с}^{-1}$ (6000 мин⁻¹).

В действительности при работе генератора величина его КПД не остается постоянной и зависит от ряда переменных величин, т.е. $\eta_{\text{ген}} = f(\bar{N}_{\text{ген}}, n, t_{\text{H}})$, где

$$\bar{N}_{\text{ген}} = \frac{N_{\text{ген}}}{\eta_{\text{ген}}} \text{ – относительная нагрузка на генератор,}$$

N – частота вращения.

Для генератора С-40, работающего обычно при $n = n_{\text{ном}} = \text{const}$, наибольшее влияние на значение его КПД оказывает величина относительной загрузки $\bar{N}_{\text{ген}}$.

На рис. 12 приведена зависимость $\eta_{\text{ген}} = f(\bar{N}_{\text{ген}})$, определенная экспериментальным путем. При определении мощности двигателя необходимо значение $\eta_{\text{ааг}}$ снимать с графика (рис. 12).

7 Определяется массовый расхода топлива

$$G_m = Q_m \rho_m, \text{ г/с},$$

где ρ_m - плотность топлива при температуре топлива T_m во время испытания, г/см^3 ;

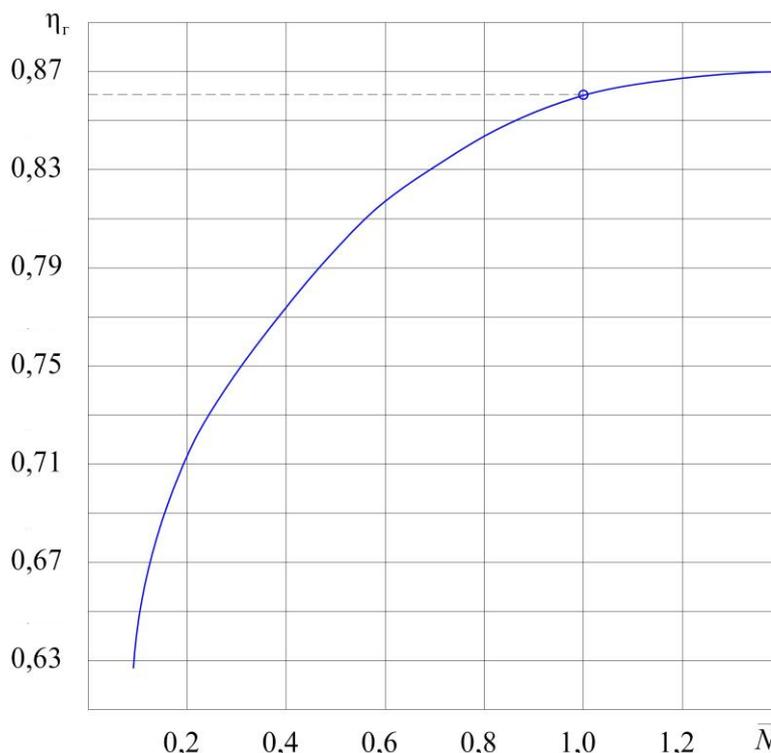


Рисунок 12 – Изменение КПД генератора С-40 в зависимости от величины

его относительной нагрузки $\bar{N} = \frac{N_{\text{нагр}}}{N_{\text{ном}}}$ ($N_{\text{ном}} = 40$ кВт) при $n = n_{\text{ном}} = \text{const}$, САУ)

$$\rho_m = \rho_0 [1 - 0,0078(T_m - 20)], \text{ г/см}^3,$$

где ρ_0 - плотность топлива при температуре 20 °С,

для керосина плотность $\rho_0 = 0,785$ г/см^3 .

8 Определяется часовой расход топлива

$$G_{m \text{ час}} = 3,6G_m, \text{ кг/ч.}$$

Результаты первичной обработки заносятся в протокол обработки (Приложение Б).

5.3 Построение стендовой нагрузочной характеристики

По результатам испытаний в сложившихся атмосферных условиях строится стендовая нагрузочная характеристика ТВД, представляющая собой зависимости четырёх основных технических данных двигателя (расхода воздуха, мощности

винта, температуры заторможенного потока в сечениях за компрессор и за турбиной) от часового расхода топлива. Характеристика строится для опробованных в процессе испытаний режимов работы на миллиметровой бумаге. Пример построения такой характеристики показан на рис. 13.

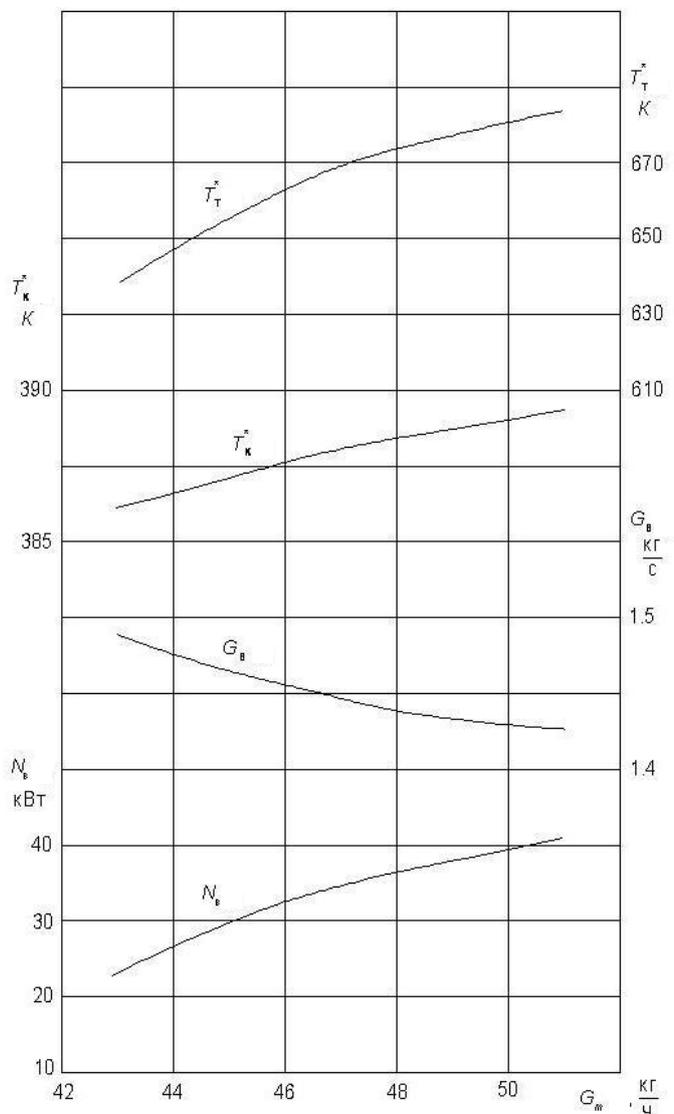


Рисунок 13 - Стендовая нагрузочная характеристика ТВД ДГ-4М
при $n_{np} = 27750 \text{ мин}^{-1}$

6 ОПРЕДЕЛЕНИЕ НОРМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ТВД

Большинство испытаний ТВД происходит в условиях, отличающихся от САУ. В этих условиях под нормальными значениями параметров (НЗП) 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 $N_{\text{э норм}}$ (или $N_{\text{в норм}}$) для всех режимов работы, а также величины допустимых отклонений от них.

Испытания двигателя ДГ-4М на данном стенде проводятся в любых стендовых условиях на обычных эксплуатационных режимах со штатным регулятором. В этом случае, используя для каждого режима заранее вычисленные коэффициенты, определяют НЗП двигателя по формулам вида

$$x_{\text{норм}} = \frac{x_{\text{изм}}}{K_x} \left(\text{например, } G_{m \text{ норм}} = \frac{G_{m \text{ изм}}}{K_{G_T}} \right).$$

Зависимость K_x обычно задают в виде графика, стандартного для всех экземпляров двигателей данной серии. Таким образом эта зависимость представляет собой фактически климатическую характеристику относительного изменения данного параметра по t_H и p_H (относительно своего нормального значения на данном режиме).

Определение НЗП с помощью коэффициентов пересчёта характерно для испытаний серийных ГТД. При этом предполагается, что закономерность связи любого параметра $K_x = f(t_H, p_H, \text{режим})$ сохраняется неизменной для всех экземпляров данной серии ГТД.

На рис. 14 показаны такие зависимости для определения нормальных значений T_K^* , T_T^* , G_B , G_m испытуемого ДГ-4М на основных эксплуатационных режимах.

Непосредственно измерение температуры газа перед турбиной T_a^* у большинства ТВД не производится. Потому для оценки и контроля её предельных значений в процессе эксплуатации часто используются результатами измерений температуры газа за турбиной T_o^* .

Величину температуры $T_{\Gamma \text{ норм}}^*$ на конкретных экземплярах ТВД можно вычислить по одному из трёх следующих методов.

1. По уравнению теплового баланса:

$$i_{\Gamma}^* = i_K^* + \frac{G_m H_u \eta_{\Gamma}}{G_B \vartheta_{\text{охл}} K_T + G_m}.$$

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

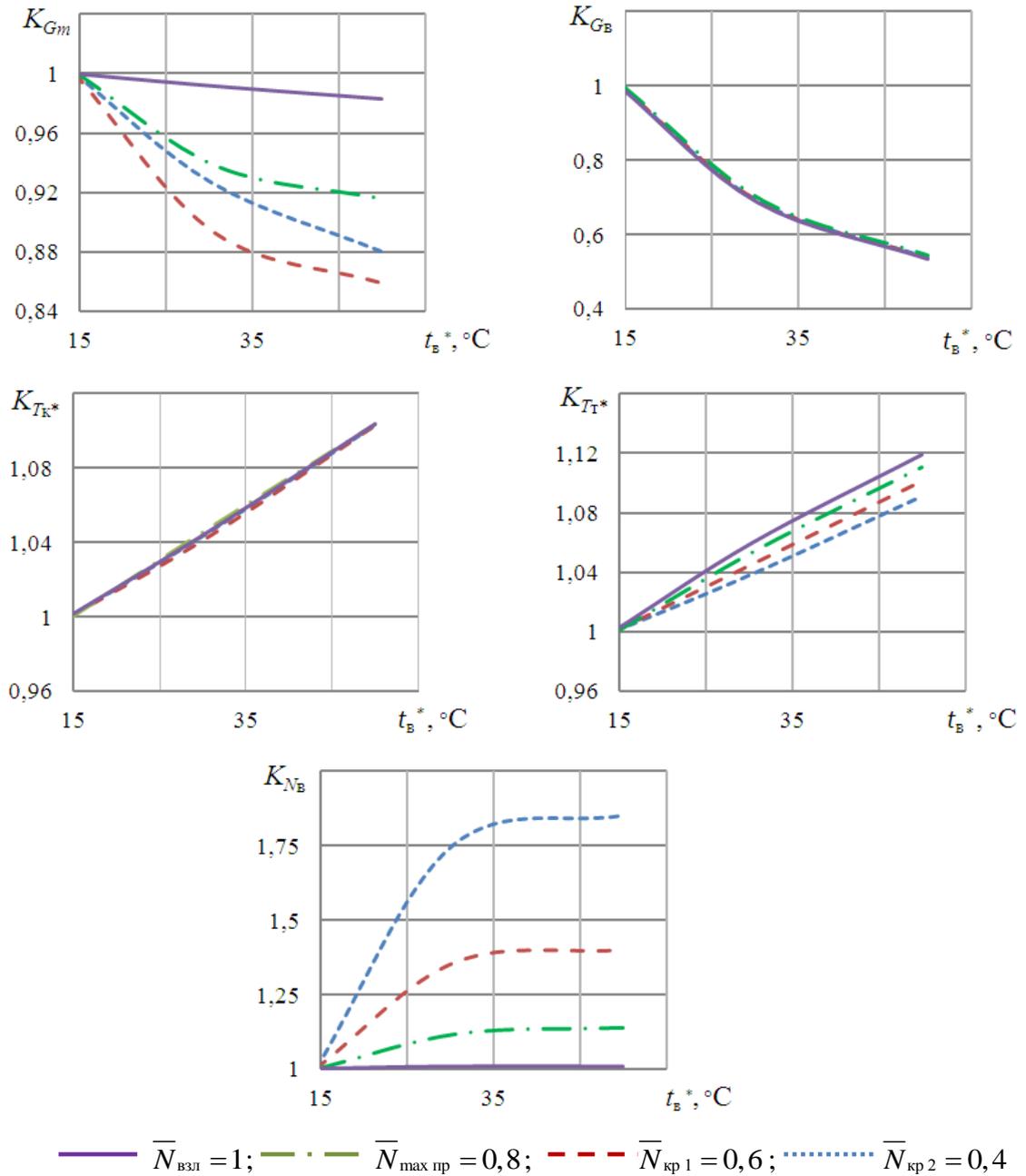


Рисунок 14 – Коэффициенты пересчёта нормальных значений параметров в зависимости от t_H и режима работы ТВД ДГ-4М ($p_H = 101,33$ кПа)

2. По уравнению мощностного баланса

$$i_{\Gamma}^* = i_{\text{T}}^* + \frac{G_{\text{B}}(i_{\text{K}}^* - i_{\text{B}}^*) + N_{\text{B}}}{(G_{\text{B}}\vartheta_{\text{охл}} + G_{\text{m}})\eta_{\text{M}}}$$

Для вычисления $T_{\Gamma \text{ норм}}^*$ следует определить $T_{\text{к норм}}^*$, $T_{\text{т норм}}^*$, $G_{\text{в норм}}$ и с требуемой достоверностью знать величину коэффициентов $\vartheta_{\text{охл}}$ и η_{M} .

3. По уравнению баланса расходов

$$T_{\Gamma}^* = \left[\frac{p_{\kappa}^* \sigma_{\kappa c} A_{\Gamma}}{G_{\text{В}} \left(\vartheta_{\text{охл}} + \frac{G_{\Gamma}}{G_{\text{В}}} \right)} \right]^2.$$

Рассчитать $T_{\Gamma \text{ норм}}^*$ по данному уравнению можно, определив $p_{\kappa \text{ норм}}^*$, $G_{\text{В норм}}$, $G_{\Gamma \text{ норм}}$, и зная с достаточной достоверностью величины коэффициентов $\sigma_{\kappa c}$, $\vartheta_{\text{охл}}$, 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 её значений, полученным по этим трем балансным уравнениям.

В лабораторной работе рекомендуется определить температуру газа перед турбиной $T_{\Gamma \text{ норм}}^*$ по уравнению мощностного баланса на взлетном режиме работы ТВД при $\vartheta_{\text{охл}} = 0,985$ и $\eta_{\text{м}} = 0,99$.

Величины энтальпий воздуха $i_{\text{в}}^*$ и i_{κ}^* , а также газа i_{Γ}^* и $i_{\text{т}}^*$ 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 ОТЧЁТ 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 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 А). Протокол подписывается студентом, оформившим его.

3. График стендовой нагрузочной характеристики ТВД ДГ-4М, выполненный на миллиметровой бумаге формата А4. Характеристика строится карандашом с применением лекал. Рекомендуемые масштабы и расположение кривых показаны на рис. 13. На графике должны быть указаны фамилия, инициалы и группа студента, а также его подпись.

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

Библиографический список

1. Солохин Э.Л. Испытания авиационных воздушно-реактивных двигателей: учебник для вузов; 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1975. 356 с.
2. Григорьев В.А., Кузнецов С.П., Гишваров А.С. и др. Испытания авиационных двигателей: учебник для вузов / под общ. ред. Григорьева В.А. и Гишварова А.С. М.: Машиностроение, 2010. 502 с.
3. Дорофеев В.М., Маслов В.Г., Первышин Н.В. и др. Термогазодинамический расчет газотурбинных силовых установок. 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. А.Я. Черкез, И.И. Онищик, Е.М. Таран и др. Испытания воздушно-реактивных двигателей / под общей ред. А.Я. Черкеза. М.: Машиностроение, 1992. 304 с.

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

H – высота полёта, м (км);

M – число Маха (отношение скорости потока к скорости звука);

p – давление, Па (кПа);

T – температура, К;

N – мощность, кВт;

C_3 – эквивалентный удельный расход топлива ТВД, кг / (кВт·ч);

π_k^* – степень повышения давления в компрессоре;

n – частота вращения, мин⁻¹;

G_B – расход воздуха, кг / с;

G_m – расход топлива, кг / ч;

ρ – плотность, кг / м³.

Индексы

v – воздух; относящийся к сечению на входе в компрессор;

vx – входной;

$г$ – газ; относящийся к сечению на входе в турбину;

изм – измеренный;

k – компрессор; относящийся к сечению на выходе из компрессора;

кр – крейсерский, критический;

n – наружный;

норм – нормальный;

пр – приведённый;

t – турбина; относящийся к сечению на выходе из турбины;

m – топливо

Сокращения

ВГТД – вспомогательный газотурбинный двигатель;

НЗП – нормальные значения параметров;

ОТД – основные технические данные;

САУ – стандартные атмосферные условия;

ТБК – термобарокамера;

ТВД – турбовинтовой двигатель.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Пример заполнения протокола испытаний к лабораторной работе № 4 (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:

$$N_B, G_B, T_K^*, T_T^* = f(G_m).$$

2 Краткая методика эксперимента: описываются последовательность основных этапов эксперимента и проводимые измерения.

3 Экспериментальная установка и её данные: кратко описываются технические характеристики, принцип работы систем стенда по созданию высотно-климатических условий.

4 Протокол испытания №1-ВКС.

Топливо: ТС-1, $t_m^* = 15^\circ\text{C}$, $\rho_m = 785 \text{ кг / м}^3$.

Двигатель: ДГ-4М.

5 Атмосферные условия: $p_H = 765 \text{ мм. рт. ст.}$, (102 КПа); $t_H = 16^\circ\text{C}$.

6.1 Результаты измерений

ре- жим	n	Генератор С-40		Сечение В-В					Сечение К-К			
		I	U _л	t _{в1} [*]	t _{в2} [*]	t _{в3} [*]	p _в [*]	Δp _в	t _{к1} [*]	t _{к2} [*]	t _{к3} [*]	p _{к изб} [*]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	%	дел	дел	°C	°C	°C	кПа	кПа	°C	°C	°C	кПа
№3	100	41	117	33	24,3	23,7	102	3,9	100,8	116,9	97,4	135,7

6.1 Окончание таблицы

Сечение Т-Т								С-С	ТДР	
$t_{Т1}^*$	$t_{Т2}^*$	$t_{Т3}^*$	$t_{Т4}^*$	$t_{Т5}^*$	$t_{Т6}^*$	$p_{Т изб}^*$	$p_{Т изб}$	t_c^*	Q_m	f
14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	кПа	кПа	$^{\circ}\text{C}$	см ³ /с	имп/с
365,8	381	353,2	358,5	353,7	360	4,99	-0,4	365,7	17,69	179

6.2 Протокол обработки результатов измерений

№ режима	T_B^*	p_B^*	T_K^*	p_K^*	π_K^*	T_T^*	p_T^*	$\frac{\Delta p_B}{p_H}$	$G_{впр}$	G_B	G_m	$N_{ген}$	N_B
	К	кПа	К	кПа		К	кПа		кг/с	кг/с	кг/ч	кВт	кВт
25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
№3	300	102	378	238	2,33	635,6	107	0,038	1,48	1,11	50	35,98	42,1

6.4 Определение нормальных значений параметров двигателя

Режим	$N_{B норм}$	$G_m норм$	$G_B норм$	$T_{K норм}^*$	$T_{T норм}^*$
	кВт	$\frac{\text{кг}}{\text{ч}}$	$\frac{\text{кг}}{\text{с}}$	К	К
39	40	41	42	43	44
взл.	42,0	50,25	1,48	390	606,5

6.4 Расчет нормального значения $T_{T норм}^*$ на взлетном режиме

$i_{B норм}^*$	$i_{K норм}^*$	$i_{T норм}^*$	$G_m норм$	$i_{Г норм}^*$	$T_{Г норм}^*$
$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{\text{кг}}{\text{с}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	К
45	46	47	48	49	50
288,2	391	622,4	0,014	754,7	727,2

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

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. Каким образом измеряются давления и температуры потока по тракту ТВД ДГ-4М?
3. Как при испытаниях определяется расход воздуха через ТВД ДГ-4М?
4. Каким образом определяется мощность N_v двигателя ДГ-4М?
5. Что называют нормальными значениями параметров ТВД?
6. Какова методика экспериментального определения нормальных значений параметров ТВД в данной лабораторной работе?
7. Дайте определение стендовой нагрузочной характеристики ТВД ДГ-4М.
8. Какова методика снятия стендовой нагрузочной характеристики ТВД ДГ-4М?
9. Какова номенклатура основных режимов работы ТВД и их характеристик?
10. Какой метод измерения мощности двигателя применен в лабораторной работе, его преимущества и недостатки в сравнении с другими методами?
11. Каким образом у испытываемого ТВД ДГ-4М изменяется величина поглощаемой мощности с вала воздушного винта?
12. Измерение каких параметров необходимо провести при испытании ТВД для расчета температуры T_r^* по уравнению теплового баланса?
13. Какие параметры следует измерить при испытании ТВД и величины каких коэффициентов необходимо знать для расчета температуры T_r^* по уравнению мощностного баланса?

