

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ИСПЫТАНИЯ
ДВУХКОНТУРНОГО ТУРБОРЕАКТИВНОГО
ДВИГАТЕЛЯ АИ-25

*Рекомендовано редакционно-издательской комиссией
по двигателям летательных аппаратов и энергомашиностроению
в качестве методических указаний*

САМАРА 2016

УДК: 629.7.036 (075)

ББК: 39.55

ИЗ74

Составители: В.А. Григорьев, Д.С. Калабухов,
Я.А. Остапюк, А.С. Прокаев, Е.П. Филинов

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.В. Бирюк

Автоматизированные испытания двухконтурного турбореактивного двигателя АИ-25: метод. указания к лаб. работе / [сост. В.А. Григорьев и др.]. – Самара: Изд-во Самар. нац. исслед. ун-та, 2016. – 40 с.: ил.

Методические указания к лабораторной работе знакомят студентов с методикой определения параметров двухконтурного турбореактивного двигателя (ТРДД) при автоматизированных испытаниях с использованием измерительно-вычислительного комплекса (ИВК). Приведены схемы и устройство учебного стенда. Описаны порядок проведения и методика лабораторной работы.

Предназначены для студентов, обучающихся по специальности 24.05.02. «Проектирование авиационных и ракетных двигателей».

СОДЕРЖАНИЕ

1	УЧЕБНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ТРДД АИ-25 И СХЕМА ПРЕПАРИРОВАНИЯ ДВИГАТЕЛЯ	4
1.1	Учебно-экспериментальный стенд для испытаний ТРДД АИ-25	4
1.2	Объект испытания – ТРДД АИ-25	6
1.3	Схема препарирования двигателя	7
2	СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ИСПЫТАНИЙ УЧЕБНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА	8
3	АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ИСПЫТАНИЙ ТРДД АИ-25
3.1	Структура автоматизированной системы и средства связи для информационного обмена	14
3.2	Сбор и передача данных с АРМ оператора	16
3.3	Преобразование измерительной информации в АСИ	17
4	ПРОЦЕСС ИСПЫТАНИЯ ДВИГАТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АСИ	20
5	ПРОЦЕСС ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ В ИНФОРМАЦИОННОЙ СРЕДЕ	25
6	МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ НОРМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ТРДД	26
6.1	Порядок проведения испытания	28
6.2	Первичная обработка результатов измерения	28
6.3	Приведение параметров двигателя к стандартным атмосферным условиям и построение стендовой дроссельной характеристики ТРДД	30
6.4	Определение нормальных значений параметров	32
7	ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТРДД ПРИ РАБОТЕ НА ПОСТОЯННОМ РЕЖИМЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ АТМОСФЕРНЫХ УСЛОВИЯХ	33
	КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	36
	БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	36
	ПРИЛОЖЕНИЕ 1	37

Цель лабораторной работы: практическое овладение методикой определения параметров двухконтурного турбореактивного двигателя (ТРДД) при автоматизированных испытаниях с использованием измерительно-вычислительного комплекса (ИВК).

В работе ставятся следующие задачи:

- ознакомление с объектом испытания – ТРДД АИ-25, стендовым оборудованием;
- изучение структурной схемы автоматизированной системы испытаний (АСИ), системы измерения и регистрации параметров ТРДД;
- овладение методикой экспериментального определения дроссельной характеристики ТРДД с использованием АСИ и методами проведения автоматизированных испытаний;
- ознакомление с алгоритмами сбора и обработки информации, изучение принципов преобразования измерительных сигналов;
- участие в испытании, определении нормальных значений параметров ТРДД АИ-25, получение протокола с результатами испытаний.

1 УЧЕБНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ТРДД АИ-25 И СХЕМА ПРЕПАРИРОВАНИЯ ДВИГАТЕЛЯ

1.1 Учебно-экспериментальный стенд для испытаний ТРДД АИ-25

На рис. 1.1. показан вид испытательного бокса стенда АИ-25 сверху. На входе в двигатель АИ-25 (3) установлен лемнискатный насадок 1. Запуск двигателя осуществляется вспомогательным газотурбинным двигателем ВГТД АИ-9 (4). Выхлопные газы от основного двигателя и ВГТД направляются через выхлопной эжектор 5 в башню шумоглушения 6. Измерительные приборы и вычислительная аппаратура установлены в стойке панелей отображения измерительной информации 7.

Пульт управления стенда (рис. 1.2) обеспечивает работу стендовых систем и позволяет, в случае необходимости, перейти с автоматизированного режима на «ручной».

Динамометрическая платформа соединяется с неподвижной станиной с помощью гибких лент и может смещаться под действием силы тяги ТРДД в осевом направлении. Расположение ТРДД АИ-25 на

силоизмерительном устройстве (СИУ) в боксе станда показано на рис. 1.3.

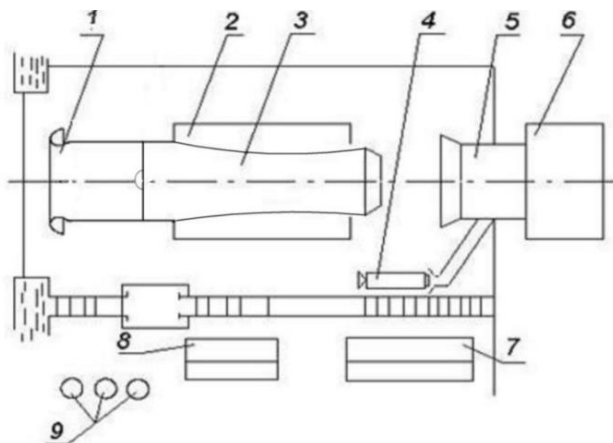


Рисунок 1.1 – Схема бокса для испытаний ТРДД АИ-25:

- 1 - лемнискатный насадок;
- 2 - силоизмерительный станок;
- 3 - ТРДД АИ-25;
- 4 - ВГТД АИ-9;
- 5 - выхлопной эжектор;
- 6 - башня шумоглушения на выходе;
- 7 - панель отображения измерительной информации;
- 8 - пульт управления;
- 9 - баллоны системы пожаротушения



Рисунок 1.2 – Пульт управления учебно-экспериментального стенда для испытаний ТРДД АИ-25



Рисунок 1.3 – Расположение ТРДД АИ-25 и ВГТД АИ-9 в боксе стенда

Усилие от платформы передается силоизмерительному датчику. Для градуировки СИУ предусмотрен градуировочный разноплечий рычаг, который расположен на неподвижной станине СИУ и нагружается образцовыми грузами.

1.2 Объект испытания – ТРДД АИ-25

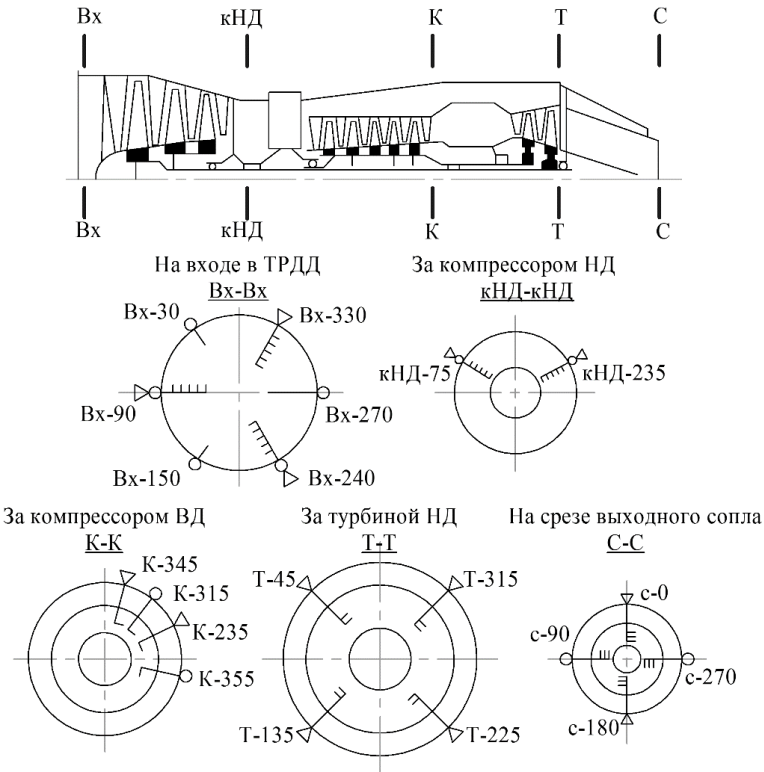
Двухвальный ТРДД АИ-25 с отдельным выхлопом из контуров относится к двигателям 3 поколения, имеет ресурс 3000 часов. Он устанавливается на небольшие самолеты типа Як-40, М-15 и т.п.

Основными элементами двигателя являются: осевой дозвуковой трехступенчатый компрессор низкого давления (вентилятор); разделительный корпус, на котором размещены узлы передней силовой подвески двигателя и агрегаты систем: масляной, топливной и запуска; осевой восьмиступенчатый компрессор высокого давления; кольцевая камера сгорания с 12 одноступенчатыми форсунками; одноступенчатая турбина высокого давления; двухступенчатая турбина низкого давления; корпус задней опоры валов с узлами задней поддерживающей подвески двигателя и нерегулируемые суживающиеся реактивные сопла наружного и внутреннего контуров.

1.3 Схема препарирования двигателя

Для измерения температур и давлений, характеризующих рабочий процесс в проточной части, двигатель препарирован соответствующими термо- и пневмогребенками. Схема проточной части двигателя АИ-25 приведена на рисунке 1.4.

Схема препарирования ТРДД АИ-25 предусматривает следующие измерения параметров в различных сечениях двигателя.



Условные обозначения:

- | | |
|----------------|--|
| приемник p | приемник T^* |
| приемник p^* | комбинированный приемник p^* и T^* |

Примечание: цифры после тире означают координаты в градусах от вертикальной плоскости двигателя сверху по часовой стрелке.

Рисунок 1.4 – Схема проточной части ТРДД АИ-25 и ее препарирование

Сечение на входе в двигатель. Δp_B – перепад между давлением заторможенного потока и статическим давлением, 3 приемника p_B и 3 пятиточечных комбинированных термопневмогребенки p_B^* и T_B^* , газодинамическое осреднение p_B^* и p_B .

Сечение за компрессором НД. $p_{кНД}^*$ и $T_{кНД}^*$ – давление и температура заторможенного потока за компрессором НД (вентилятором), применены 2 пятиточечных комбинированных термопневмогребенки.

Сечение за компрессором. p_K^* и T_K^* – давление и температура заторможенного потока за компрессором ВД, применены 2 индивидуальных приемника давления и две термомпары.

Сечение за турбиной. T_T^* – температура заторможенного потока за турбиной НД, применены 4 двухточечных термомпары.

Сечение на срезе выходного сопла. p_{CI}^* и $T_{CI}^* = T_T^*$ – давление и температура заторможенного потока по внутреннему контуру на срезе сопла, 2 трехточечных термомпары (гр. ХА), 2 пятиточечных приемника p_{CI}^* .

2 СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ИСПЫТАНИЙ УЧЕБНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА

При испытании также измеряются следующие параметры двигателя: тяга двигателя; расход топлива, температура топлива, расход воздуха, температура воздуха, давление в различных сечениях двигателя, температуры в различных сечениях двигателя, атмосферное давление, обороты роторов компрессоров низкого и высокого давления, угол поворота РУДа, величину вибрации двигателя.

Система измерений для проведения учебных испытаний двигателя АИ-25 учитывает следующие требования:

- объем информации, получаемый при испытании, должен обеспечивать выполнение студентами основных элементов термогазодинамического анализа рабочего процесса;
- препарирование двигателя должно обеспечивать возможность ввода сигналов в автоматизированную систему измерений с визуальным контролем измеряемых параметров на виртуальных приборах автоматизированной системы испытаний (АСИ);

- основные конструктивные решения препарирования двигателя должны соответствовать типичному препарированию ГТД.

В системе измерения комплексной АСИ учебно-экспериментального стенда используются современные датчики и преобразователи.

Для измерения температуры воздуха на входе двигателя применяются термопреобразователи сопротивления ТСП 012-014. Они являются аналогами ТСП 1288, ТСП 0879-01. Термопреобразователи состоят из чувствительного элемента (одного или двух), защитной арматуры и клеммной головки. Чувствительные элементы термопреобразователей предназначены для преобразования изменения температуры измеряемой среды в изменение электрического сопротивления. Чувствительные элементы изготовлены из платинового микропровода и выполнены в виде каркасной или бескаркасной (в виде кокона) катушки. Для установки на объекте термопреобразователи снабжены штуцерами с резьбой М20х1,5 или М27х2. Уплотнение места соединения термопреобразователя с трубопроводом обеспечивается использованием медной уплотнительной прокладки, входящей в комплект поставки. Точность измерения составляет не более 0,5%.

Для измерения температуры топлива, масла, температуры газа за компрессором используются термопары типа Т-49 (ХК) с погрешностью 0,5%.

Для измерения температуры за срезом сопла применяются термопары типа ХА с диапазоном измерения (273-875 К) с погрешностью 0,5%.

Датчики давления. Для измерения давлений в системе используются измерительные преобразователи избыточного давления SITRANS P, серии Z, которые позволяют измерять давление агрессивных и неагрессивных газов, жидкостей и пара. Характерными особенностями SITRANS P являются:

- высокая точность измерения (погрешность не более 0,25%);
- измерение давления агрессивных и неагрессивных веществ;
- измерение давления жидкостей, газов и пара;
- измерительная ячейка с температурной компенсацией;
- компактная конструкция.

Схема измерительного преобразователя датчика давления приведена на рис. 2.1. К основным элементам датчика относятся:

- корпус 4 из нержавеющей стали с кремниевой измерительной ячейкой и платой электроники 3;
- кремниевая измерительная ячейка с температурной компенсацией оборудована тонкопленочным тензорезистором 2 (тонкопленочный DMS), который расположен на керамической мембране 1, через которую передается рабочее давление p .

Выходное напряжение измерительных ячеек подается на усилитель и преобразуется в выходной ток 4...20 мА. Выходной ток линейно пропорционален входному давлению.

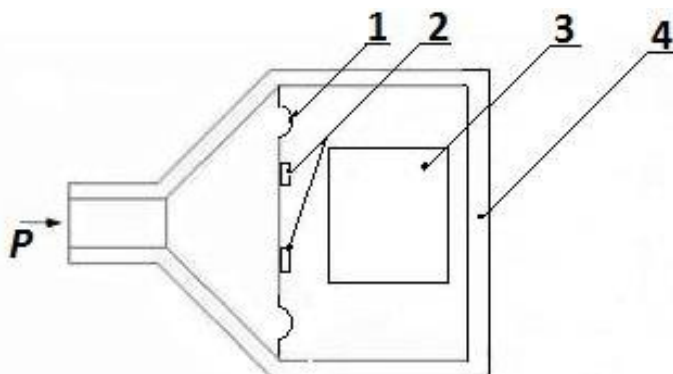


Рисунок 2.1 – Схема измерительного преобразователя SITRANS P, серия Z
1 - мембрана; 2 - тензорезисторы; 3 - электронный блок; 4 - корпус

Расход воздуха определяется по измерениям на лемнискатном насадке, обеспечивающем безотрывное течение воздуха, чем достигается равномерное поле скоростей потока на входе в двигатель, практически без потерь давления (т.е. $p_H \approx p_H^*$).

Для измерения перепада давлений используются датчики типа SITRANS P DS III. Установка диапазона измерения у данного типа датчиков осуществляется с помощью клавиш управления или через коммуникацию HART, PROFIBUS-PA или Foundation Fieldbus интерфейсы. Обширная функциональность обеспечивает хорошее согласование измерительного преобразователя давления с элементами АСИ.

Выходной сигнал датчика – 4...20 мА. Погрешность измерения не более 0,25%. Датчик предназначен для измерения: дифференциального давления, малого положительного или отрицательного избыточного давления, расхода.

Для измерения расхода топлива используется кориолисовый расходомер типа MASS 2100 DI 1.5. Данный расходомер подходит для измерения расхода малых количеств жидкостей и газов любого типа. Он обеспечивает отличные результаты по точности измерения расхода, динамическому диапазону и точности измерения плотности. Удобная установка с помощью механического и электрического интерфейса Plug & Play гарантирует высокую точность измерения и простое управление. На рис. 2.2 приведена схема, поясняющая принцип действия и конструкцию кориолисового расходомера. Чувствительным элементом расходомера являются две трубки. По ним движется поток жидкости, который разделяется в трубках на две равные части.

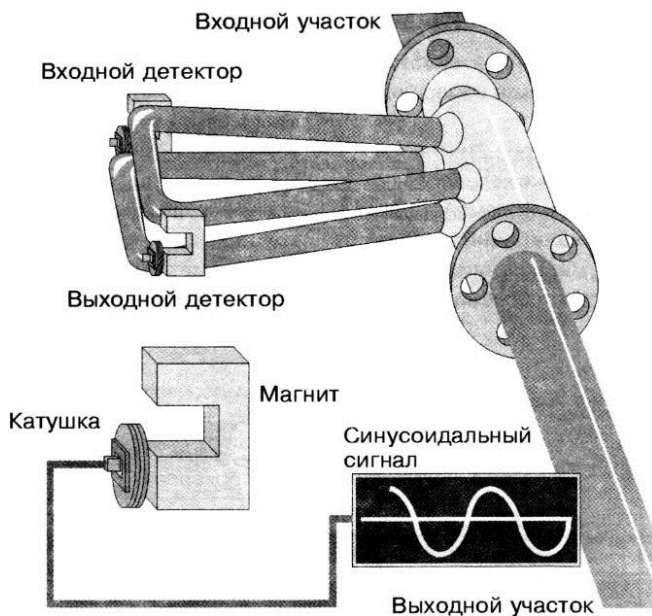


Рисунок 2.2 – Конструкция кориолисового расходомера

Около трубок установлены задающие катушки, которые заставляют эти трубки колебаться в противоположном направлении. При отсутствии расхода на детекторах (см. рис. 2.2) формируются синусоидальные сигналы с одинаковой фазой. При движении измеряемой среды через колеблющиеся расходомерные трубки возникает эффект Кориолиса – возникает кориолисовое ускорение, а, следовательно, ко-

риолисовая сила. Эта сила направлена против движения трубки, приданного ей задающей катушкой. В результате воздействия кориолисовой силы на трубки они изгибаются, в результате на детекторах (входном и выходном) появляется сдвиг фаз.

Величина изгиба, величина сдвига фаз прямо пропорциональна массовому расходу жидкости. Подсчитывается интервал времени, равный сдвигу фаз сигналов детекторов. Интервал сдвига во времени между сигналами входного и выходного детекторов прямо пропорционален массовому расходу. Преобразователь расхода обеспечивает измерение массового расхода, объемного расхода, плотности, температуры и расхода фракций.

Характерными особенностями данного преобразователя являются:

- высокая точность - не менее 0,1 % от количества массового расхода;
- большой динамический диапазон свыше 500:1, от 65 кг/ч до нескольких т /ч; благодаря точности измерения плотности не менее 0,001 г/см³ с точностью повторяемости не менее 0,0002 г/см³ обеспечивается полная функциональность плотномера;
- калибровочный коэффициент преобразователя расхода действует и для измерений газа.

Кроме того, для измерения расхода топлива используется турбинный расходомером ТДР9-1-1 с расчетным диапазоном 0.08...0.4 л/с.

Измерение тяги двигателя осуществляется с помощью устройства для измерения усилий SIWAREX R серии SB, на которое опирается подвижная платформа с испытуемым двигателем. Измерительным элементом датчика является упругий элемент с тангенциальным напряжением из нержавеющей стали, на которой находятся тензометрические полоски (DMS). Они находятся под углом 45° к продольной оси сбоку на упругом элементе, подвергаясь тем самым нагрузке на срез. Под действием силы тяги упругий элемент и вместе с ним установленные DMS эластично меняют свою форму, в результате на выходе датчика появляется пропорциональное нагрузке измерительное напряжение. Перемещение подвижной части силоизмерительной ячейки при номинальной нагрузке составляет максимум 0,5 мм. Погрешность измерения тяги датчиком SIWAREX R серии SB составляет не более 0,5%.

Для определения угла поворота дроссельной заслонки РУД используется датчик угла поворота ДК 1-С (инклинометр) с электриче-

ским выходным сигналом, пропорциональным углу наклона датчика.

Высокая точность, небольшие размеры, отсутствие подвижных механических узлов и простота крепления на объекте датчика делают целесообразным их использование не только в качестве датчиков крена, но и в качестве угловых датчиков на стационарных и подвижных объектах.

Инклинометр спроектирован так, что имеет линейную зависимость выходного сигнала от угла наклона в одной плоскости (рабочей плоскости) и практически не изменяет показания в другой (нерабочей) плоскости, при этом его сигнал слабо зависит от изменения температуры.

Электронный блок питается от однополярного напряжения в диапазоне 5...36 В, потребляя при этом ток от 5 мА до 10 мА в зависимости от напряжения питания. При этом допускается пульсация питающего напряжения до 200 мВ. Чувствительный элемент инклинометра выполнен в виде ампулы, установленной на печатной плате электронного преобразователя.

Частота вращения роторов НД и ВД компрессора определяется с помощью датчиков ДТЭ-2, частотный сигнал которых подается на входную плату дискретных сигналов контроллера АСИ.

Величина атмосферного давления измеряется датчиком абсолютного давления типа SITRANS P серии Z с диапазоном измерения 90...110 кПа.

3 АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ИСПЫТАНИЙ ТРДД АИ-25

Использование АСИ позволяет перейти на более высокий качественный уровень проведения испытаний ГТД при решении следующих основных технологических, организационных и экономических задач:

- повышение эффективности и надежности управления режимами работы ГТД и стендовых систем;
- повышение информативности и достоверности полученных результатов;
- оптимизация режимов работы, сокращение времени испытаний и экономия топлива и ресурса;

- увеличение сроков эксплуатации, снижение финансовых затрат на испытание двигателя, улучшение условий труда эксплуатационного персонала.

Для этого на автоматизированном учебно-экспериментальном стенде предусмотрены:

- рациональная автоматизация сбора, обработки и представления информации пользователям;
- автоматическое и ручное управление исполнительными механизмами;
- оптимальное управление параметрами технологических процессов;
- выявления опасных и предаварийных ситуаций в автоматическом режиме.

Для обеспечения процесса испытаний ГТД с использованием комплексной автоматизированной системы на учебно-исследовательском стенде решены вопросы автоматизации предпусковых операций, запуска, установки режимов работы двигателя, измерения и обработки параметров двигателя, его остановки после выполнения программы.

Управление стендом в ручном режиме осуществляется оператором с пульта, на котором размещаются все органы управления и штатные индикаторы двигателей АИ-9 и АИ-25. Управление может осуществляться при помощи виртуальных манипуляторов, отображаемых на АРМ оператора и при помощи штатного рычага управления двигателем.

При автоматическом режиме управления ходом испытания оператор имеет возможность в любой момент времени вмешаться в процесс управления – остановить двигатель с помощью кнопки «Аварийный останов». Запуск и останов двигателя АИ-25 осуществляется в соответствии с инструкцией по запуску двигателя АИ-25, а также в соответствии с инструкцией по запуску АИ-9.

До и после испытания выполняются градуировки измерительных каналов и формируются градуировочные зависимости.

3.1 Структура автоматизированной системы и средства связи для информационного обмена

Автоматизированная система испытаний АИ-25 состоит из следующих главных компонентов (рис. 3.1):

- датчики и исполнительные механизмы;
- пульт управления;
- программируемый контроллер;
- автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора;
- сервер базы данных (БД);
- АРМ преподавателя и студентов.

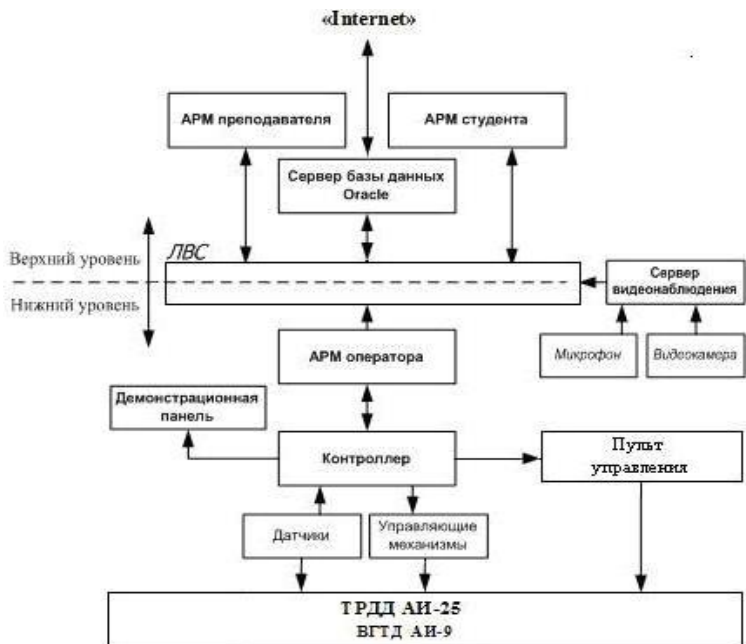


Рисунок 3.1 – Структурная схема построения АСИ АИ-25

Помимо вышеперечисленных компонентов в систему включены демонстрационные панели, сервер видеоконференции, видеосервер, коммуникационное оборудование.

АСИ АИ-25 образует два уровня, соединенных между собой линиями внутренней связи (ЛВС):

- нижний уровень: датчики, контроллер, демонстрационные панели, пульт управления и АРМ оператора;
- верхний уровень: сервер БД и АРМ преподавателя и студента.

Нижний уровень системы функционирует в реальном времени и обеспечивает регистрацию параметров технологического процесса. Система нижнего уровня строится на базе программно-аппаратных средств SIMATIC S7 фирмы Siemens. Аппаратные средства системы нижнего уровня включают: программируемый контроллер SIMATIC S7-300; модули ввода/вывода аналоговых и дискретных сигналов; демонстрационные панели АРМ оператора. Для обеспечения информационного обмена между контроллером и демонстрационными панелями используется сеть нижнего уровня Profibus.

Информационная подсистема верхнего уровня функционирует на базе локальной вычислительной сети и включает сервер баз данных, автоматизированные рабочие места преподавателя и студентов, сервер видеоконференции, расположенные в учебном классе.

Все компьютеры подключаются к ЛВС с использованием стандартного сетевого адаптера 10/100 Мбит/с через коммутатор Ethernet.

На сервере БД формируется база данных технологической информации АСИ АИ-25 в целом, поддерживается возможность конфигурирования базы данных и сопровождения архива значений параметров.

В основу построения АСИ АИ-25 положена концепция открытых систем, базирующаяся на применении международных стандартов в области автоматизации и современных информационных технологий.

3.2 Сбор и передача данных с АРМ оператора

Сбор и передача данных с АРМ оператора в архив на сервере БД осуществляется специализированным интерфейсным приложением. Функционально автоматизированную систему испытаний АИ-25 можно разделить на следующие подсистемы:

- подсистема управления двигателем, включающая комплекс датчиков, преобразующих физическое значение параметра в изменение электрических параметров, комплекс исполнительных механизмов и программируемый логический контроллер, предназначенный для ввода/вывода и предварительной обработки контролируемых параметров и управляющих сигналов стенда;
- подсистема визуализации процесса испытаний, состоящей из демонстрационных панелей и АРМ оператора;

- информационная подсистема, включающая сервер баз данных на основе СУБД Oracle для длительного хранения данных и видеопотока и учебно-исследовательские рабочие места;
- подсистема видеоконференции;
- подсистема видеонаблюдения;
- подсистема локальной вычислительной сети.

При создании АСИ использовались следующее программное обеспечение и методы его реализации. К ним относятся:

- стандартные программно-аппаратные средства SIMATIC для системы контроля двигателем, обеспечивающих возможность расширения и модифицирования системы по контролируемым параметрам;
- применение стандартных шин Industrial Ethernet и Profibus;
- использование инструментальной системы программирования контроля и визуализации данных (SCADA–системы) WinCC (Siemens, Германия), обеспечивающей высокоуровневое программирование человеко-машинного интерфейса для автоматизированных рабочих мест.

3.3 Преобразование измерительной информации в АСИ

Сигналы со всех датчиков поступают на входные модули контроллера, где производится их усиление и преобразование.

Контроллер SIMATIC S7-300 представляет собой модульное программируемое устройство серийного производства фирмы Siemens, предназначенный для построения систем автоматизации низкой и средней степени сложности и является основным узлом АСИ учебно-экспериментального стенда АИ-25.

Контроллер SIMATIC S7-300 устанавливается на профильную шину. Возможны конфигурации с одной или несколькими стойками расширения, соединенными между собой.

В состав контроллера входят:

- модуль центрального процессора (CPU), в зависимости от степени сложности решаемой задачи в контроллерах могут быть использованы различные типы центральных процессоров, отличающихся производительностью, объемом памяти, наличием или отсутствием встроенных входов-выходов и специальных функций, количеством и видом встроенных коммуникационных интерфейсов и т.д.;

- сигнальные модули, предназначенные для ввода-вывода дискретных и аналоговых сигналов с различными электрическими и временными параметрам;
- коммуникационные процессоры для подключения к сетям PROFIBUS, Industrial Ethernet, AS-Interface или организации связи по PtP (point to point) интерфейсу;
- функциональные модули, способные самостоятельно решать задачи автоматического регулирования, позиционирования, обработки сигналов, такие модули снабжены встроенным микропроцессором и способны выполнять возложенные на них функции даже в случае отказа центрального процессора ПЛК.

Аналого-цифровой преобразователь. При измерении параметров двигателя (давление, тяга, температура и т.д.) с помощью датчиков и преобразующей аппаратуры формируются электрические сигналы, зависящие по величине от измеряемых параметров. Для проведения цифровой обработки измерительной информации аналоговые электрические сигналы необходимо преобразовать в двоичный код. Это осуществляет аналого-цифровой преобразователь (АЦП) в модуле ввода аналоговых сигналов контроллера. Существует множество способов преобразования аналогового сигнала в цифровой код, представляющий собой дискретную последовательность импульсов.

На практике чаще всего используются аналогово-цифровое преобразование с помощью импульсно-кодовой модуляции. Процесс преобразования в этом случае начинается с формирования непрерывного сигнала в виде последовательности отсчетов, которые берутся через определенный промежуток времени (или с определенной частотой дискретизации). Эту функцию выполняет схема, называемая устройством выборки-хранения. Запоминая мгновенные значения входного сигнала (обычно на конденсаторе), это устройство обеспечивает сохранение величины взятого отсчета на время оцифровки. Процесс оцифровки состоит в представлении амплитуды каждого отсчета в форме двоичного кодового символа с определенным количеством разрядов.

Необходимо отметить, что n -разрядный АЦП может сформировать лишь 2^n различных двоичных кодовых знаков (256 для 8 разрядов, 1024 для 10 разрядов и 4096 для 12 разрядов).

Разница между двумя соседними кодами соответствует аналоговому весу младшего значащего разряда (МЗР). Изменение входного напряжения на величину, меньшую по сравнению с этой разницей, может быть не отражено в выходных данных АЦП.

Кроме того, некоторые преобразования вносят дополнительную погрешность и формируют результат с точностью до одного или даже двух МЗР. Такая дискретность результатов преобразования является следствием характерной для АЦП передаточной функции в виде «ступеньки» (рис. 3.2 (а)).

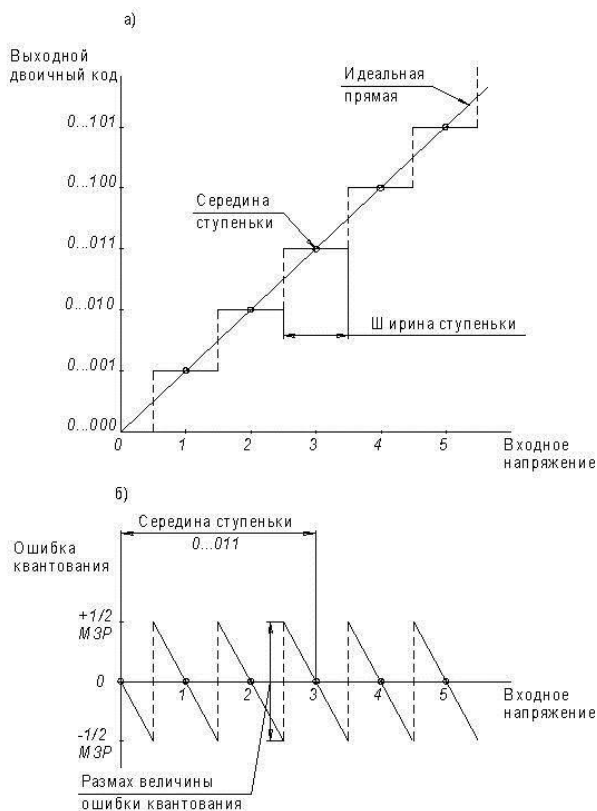


Рисунок 3.2 – Передаточная характеристика АЦП

- а) диаграмма квантования входного сигнала в АЦП,
- б) графическое отображение ошибки квантования

Очевидно, что в процессе аналого-цифрового преобразования всегда присутствует ошибка, называемая ошибкой квантования. Причины ее возникновения поясняются на рис. 3.2 (б). Ошибка квантования возникает вследствие замены искомой величины отсчета входного сигнала ее дискретным эквивалентом в виде выходного кода – x и определяется как разность между графиками ступенчатой передаточной характеристики и идеальной прямой.

Максимальная величина ошибки для передаточной характеристики, приведенной на рис. 3.2 (а) равна половине величины шага квантования (половине аналогового веса младшего значащего разряда АЦП). Эту особенность необходимо учитывать, т.к. при использовании, например, 8-разрядного АЦП с полной шкалой входного напряжения 5 В появляется неизбежная погрешность преобразования, равная 20 мВ. Несмотря на то, что эта погрешность составляет лишь 0,4%, ее необходимо принимать во внимание при разработке АСНИ. При использовании в АСИ 12-разрядного АЦП, величина погрешности преобразования снижается до 0,1%.

4 ПРОЦЕСС ИСПЫТАНИЯ ДВИГАТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АСИ

Процесс испытания ТРДД АИ-25 с использованием комплексной автоматизированной системы состоит из нескольких этапов:

1. После включения всех систем стенда и автоматизированной системы испытаний на АРМ оператора запускается программное обеспечение (ПО) испытаний двигателя АИ-25. На один из мониторов выводится изображение двигателя, фиксируемое с помощью цифровой камеры, установленной в боксе. На втором мониторе АРМ оператора и на 5 демонстрационных панелях осуществляется контроль всех измеряемых параметров на виртуальных приборах в виде манометров или гистограмм (рис. 4.1). При проведении лабораторных работ студенты могут снимать показания с демонстрационных панелей.

На АРМ оператора задается программа испытаний, в которой прописываются необходимые режимы, на которых производятся измерения параметров, длительность работы на режимах. Для запуска двигателя с АРМ оператора на мониторе отображаются кнопки управления.

2. В процессе подготовки к запуску двигателя с пульта управления стенда или по программе АСИ подаются команды на открытие заслонок канала всасывания и башни шумоглушения, а также включаются топливные насосы.

Если опрос системы сигнализации и блокировки указывает, что заслонки канала всасывания и башни шумоглушения открыты, в топливной магистрали установлено необходимое давление, то на мониторе загорается табло «Стенд готов к пуску».

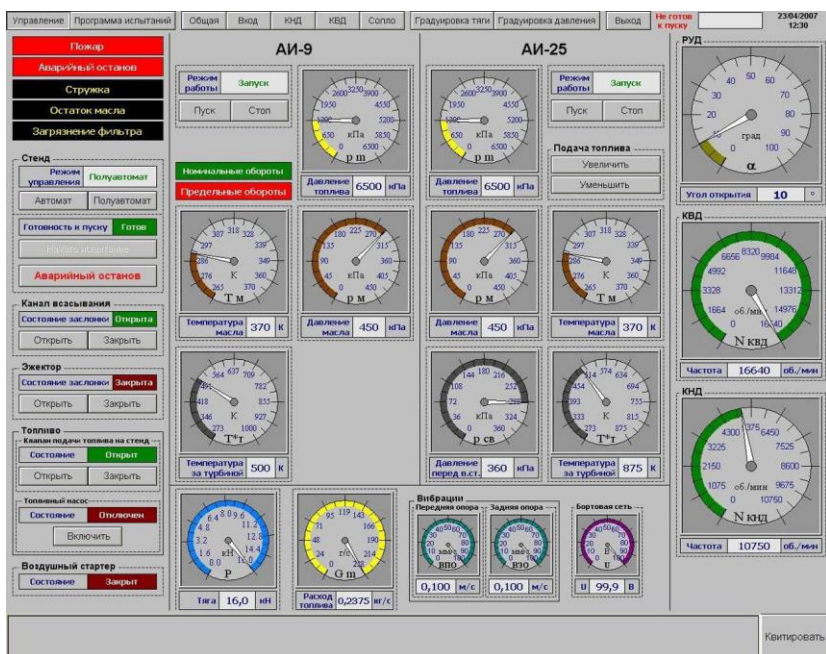


Рисунок 4.1 – Виртуальная панель контроля и управления двигателем в АСИ

3. Запуск вспомогательного газотурбинного двигателя АИ–9 в автоматизированном режиме управления процессом испытания происходит автоматически после появления сигнала о готовности стенда к запуску.

В ручном (с пульта стенда) и полуавтоматическом (с АРМ оператора) режимах для запуска АИ–9 требуется нажать соответствующую кнопку на пульте или на экране монитора. При этом на АРМ оператора контролируется режим работы двигателя АИ-9, его основные пара-

метры. После прогрева в течение 1-2 минут, если все параметры в норме, в автоматическом режиме по заданной программе АСИ производится запуск ТРДД АИ-25.

В ручном и полуавтоматическом режиме для запуска ТРДД АИ-25 требуется нажатие кнопки «Запуск АИ-25». Во время запуска АИ-25 контролируются следующие параметры двигателя: температура на срезе сопла первого конура и давление в топливной системе ГГД.

В случае если контролируемые параметры не соответствуют заданным значениям, то контроллер выдает команду «Аварийный останов», все системы отключаются и запуск двигателя прекращается.

Если запуск двигателя АИ-25 проходит без отклонения параметров от ТУ, то в соответствии с заданной программой происходит отключение АИ-9, а ТРДД АИ-25 прогревается на режиме «малого газа» в течение 1-2 минут.

Кнопка «Аварийный останов» на пульте управления и панели оператора доступна в любом режиме управления и в любом режиме работы стенда.

4. После прогрева ТРДД АИ-25 контроллер, управляя положением РУДа с помощью специального исполнительного устройства, переводит двигатель на 1-й режим работы по значению частоты вращения ротора высокого давления. При достижении заданного режима и работы двигателя в течение 1-2 минут производятся измерения параметров, обработка результатов испытаний на данном режиме и вывод на монитор АРМ оператора основных параметров двигателя. Студенты имеют возможность регистрировать параметры двигателя на демонстрационных панелях (см. рис. 4.2-4.5).

Через заданный по программе интервал времени происходит перевод ТРДД АИ-25 на следующий режим работы и после его установки, аналогично первому режиму, производятся измерения и обработка параметров. Аналогичные операции производятся на всех режимах работы ТРДД, количество которых задается программно перед испытанием.

Снятие экспериментальной дроссельной характеристики проводят на 4-х режимах работы двигателя: взлетный режим, максимальный продолжительный режим, крейсерский режим и режим малого газа.

5. После выполнения заданной программы контроллер отключает авиационный двигатель после его работы в режиме малого газа в течение 20-40 с.

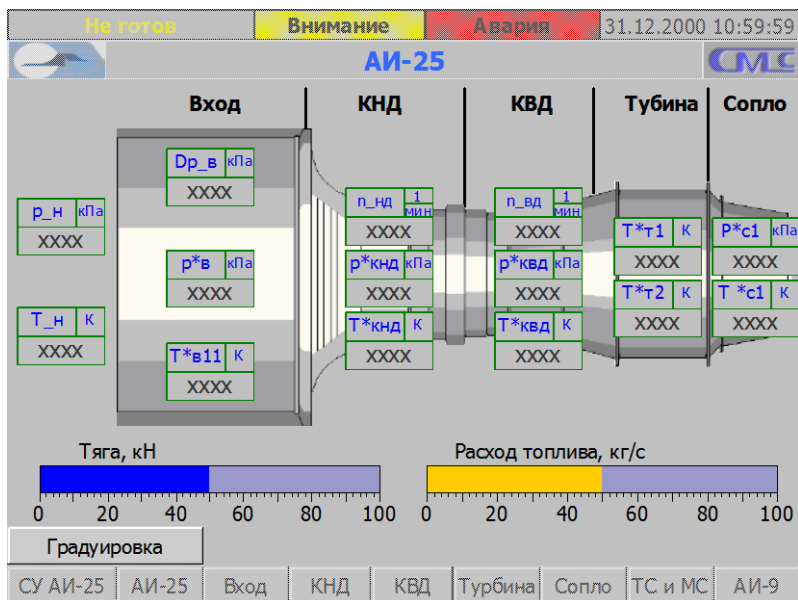


Рисунок 4.2 – Демонстрационная панель основных параметров ТРДД AI-25



Рисунок 4.3 – Демонстрационная панель для регистрации параметров компрессора ВД

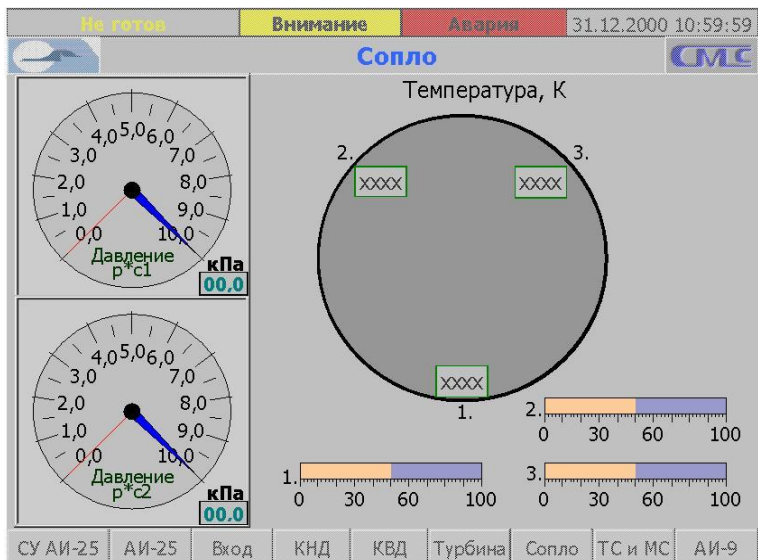


Рисунок 4.4 – Демонстрационная панель для регистрации параметров газа за соплом

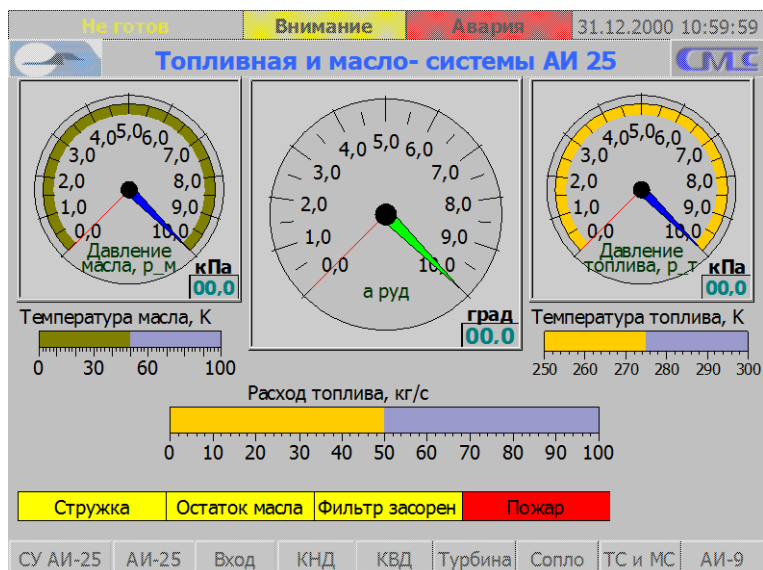


Рисунок 4.5 – Демонстрационная панель для регистрации параметров топливной и масляной систем двигателя АИ-25

Сохраненные значения параметров двигателя на АРМ преподавателя можно посмотреть в виде графиков и таблиц.

В ходе испытаний значения параметров и изображение двигателя, фиксируемое с помощью видеокамеры, записываются в базу данных на сервере Oracle и становятся доступными для математической обработки на АРМах студентов и преподавателя.

5 ПРОЦЕСС ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ В ИНФОРМАЦИОННОЙ СРЕДЕ

В информационной среде поддерживаются все организационно-технические аспекты, сопровождающие процессы организации выполнения лабораторных работ и представление испытания двигателя:

- разграничение прав доступа к системе;
- регистрация студентов; доступ к методическим материалам; наблюдение за процессом испытания двигателя на рабочих местах преподавателя и студентов с задержкой в несколько секунд от реального времени (определяется на уровне настроек);
- воспроизведение процесса испытания на основе архивных данных с дискретностью регистрации данных (минимум 1 секунда);
- доступ к значениям параметров по требуемому срезу времени любого испытания;
- регистрация результатов (расчётных значений) выполнения лабораторных работ в базе данных.

До начала эксплуатации информационной среды администратор системы регистрирует пользователей и назначает им соответствующие права. На основе назначенных прав каждый участник процесса испытания двигателя будет иметь доступ к соответствующим возможностям системы.

Для проведения лабораторных работ преподаватель регистрирует студентов в системе и определяет лабораторную работу для выполнения. Допуск студента к выполнению работы также фиксируется в базе данных. Далее преподаватель уточняет, с использованием каких испытаний будет выполняться лабораторная работа – на реальном испытании или на основе испытания ранее записанного в архив.

Значения параметров испытания из архива воспроизводятся с дискретностью 1 секунда и, таким образом, студент имеет возможность наблюдать испытание в псевдореальном времени.

Студенты получают доступ к методическим материалам, к архиву испытаний или к просмотру реального испытания. Возможности студентов по ручной регистрации данных с отображаемых на дисплее приборов одинаковы, как при наблюдении реального испытания, так и при просмотре испытания из архива.

Кроме ручной регистрации студенты имеют возможность выбрать из архива любое испытание, просмотреть из него любой перечень параметров и экспортировать в файл формата Excel требуемые значения параметров за указанное время. На основе полученных данных студент выполняет требуемые расчёты и вносит их в базу данных.

Преподаватель в эту же базу данных вносит свои «эталонные» значения. Имеется возможность визуального сравнения расчётных значений студента и преподавателя. Результат (оценка) выполнения лабораторной работы студентом фиксируется преподавателем в базе данных.

6 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ НОРМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ТРДД

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

Нормальными значениями параметров (НЗП) данного ТРДД называют его индивидуальные ОТД, измеренные в САУ на заданных в ТУ режимах работы.

К важнейшим ОТД ТРДД относятся: тяга $P_{дв}$, расход топлива G_T , удельный расход топлива $C_{уд}$, степень повышения давления в компрессоре π_k , температура за турбиной T_T^* , частота вращения роторов $n_{нд}$, $n_{вд}$ и другие. В технических условиях для каждой серии ТРДД оговариваются нормальные значения тяги на каждом режиме, которые должны иметь все серийные экземпляры двигателей, а также допустимые отклонения от них.

ТРДД с нерегулируемыми проходными сечениями имеет одну степень свободы, поэтому для определения других НЗП достаточно знать заданное значения тяги на каждом режиме.

Чтобы определить степень соответствия фактических данных серийных экземпляров двигателя требуемым, измеренные параметры на

каждом режиме пересчитываются на НЗП с помощью специальных (заранее определенных для всей серии) нормализующих коэффициентов.

В случае опытных ТРДД такой пересчет проводится индивидуально для каждого экземпляра путем испытания на режимах, подобных его работе в САУ. Для этого измеряют его дроссельную характеристику и приводят к САУ.

Исходя из заданного значения норм тяги ($P_{дв\ норм}$) на каждом режиме, можно, пользуясь приведенной дроссельной характеристикой ТРДД, определить ту частоту вращения ротора ($n_{ВД\ пр} = n_{ВД\ норм}$) на каждом режиме, которая будет соответствовать его работе в САУ. По величине $n_{ВД\ норм}$ можно определить все другие нормальные значения параметров ТРДД (см. схему на рис. 6.1).

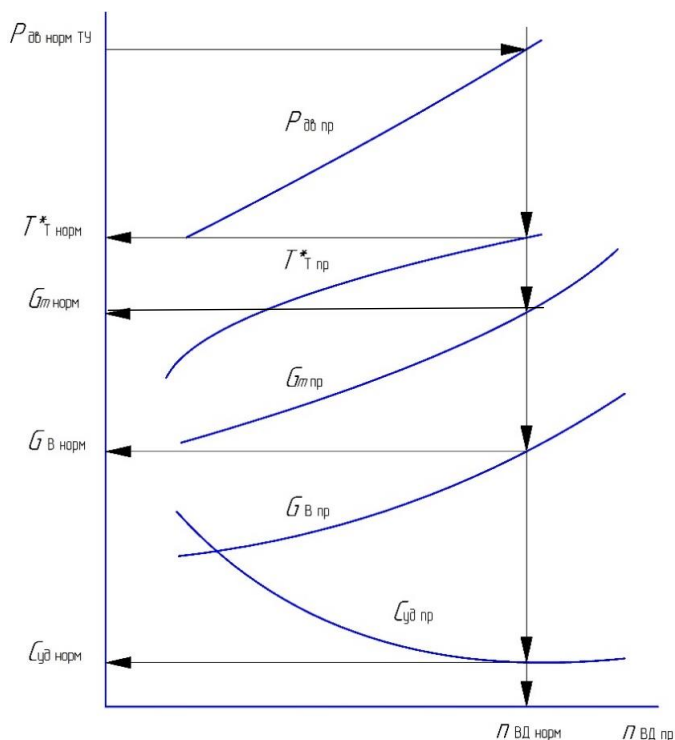


Рисунок 6.1 – Схема определения нормальных значений параметров ТРДД по приведенной дроссельной характеристике

Найденные таким образом значения параметров ТРДД будут соответствовать тому случаю испытания двигателя в САУ, когда регулирующие органы находятся в позиции, соответствующей их отладке на заданные для каждого режима нормы тяги у данного экземпляра ТРДД. При этом приведенные частоты вращения ротора ВД и других параметров производятся по параметрам на входе в двигатель.

6.1 Порядок проведения испытания

За 15...20 минут до начала эксперимента включаются все приборы и стендовые системы (для обеспечения стабильности их характеристик). Студенты распределяются по рабочим местам.

Испытание проводится в следующей последовательности:

1. Осуществляется запуск и прогрев двигателя. Эти операции, а также перевод с режима на режим выполняются штатным персоналом лаборатории. Во время прогрева двигателя каждый студент проводит оценку приборов и практикуется в измерении параметров на различных рабочих местах.

2. Двигатель выводится на наименьший крейсерский режим. После выдержки 1...2 мин и подачи оператором звукового сигнала каждый студент производит измерение закрепленного за ним параметров и запись результата в бланк замера.

3. Двигатель выводится на следующий более высокий режим работы и повторяется выполнение операций, перечисленных в п. 2. В данной работе испытание двигателя проводится на четырех режимах: трех крейсерский и максимальном продолжительном.

6.2 Первичная обработка результатов измерения

Обработка результатов измерений проводится в следующей последовательности:

1. По показаниям приборов определяют значения измеренных частот вращения ротора компрессора по следующей формуле:

$$n_k = \frac{\bar{n}_{\text{изм}}}{100} n, \text{ мин}^{-1}$$

где $n_{\text{ВД}} = 16640 \text{ мин}^{-1} \rightarrow 100\%$;

$n_{\text{НД}} = 11878 \text{ мин}^{-1} \rightarrow 100\%$;

$\bar{n}_{\text{изм}}$ – относительная частота вращения ротора по шкале прибора в %.

2. Суммарный расход воздуха через двигатель определяется косвенным путем по известному уравнению:

$$G_B = \frac{m_B q(\lambda_B) p_B^* F_B}{\sqrt{T_B^*}},$$

где $m_B = 40,4$; $F_B = 0,255 \text{ м}^2$; $p_B^* = p_H$, кПа; $T_B^* = T_H$, К;

$q(\lambda_B)$ – газодинамическая функция приведенной скорости.

Величина $q(\lambda_B)$ определяется по таблице ГДФ по величине $\pi(\lambda_B)$, или по формулам:

$$\pi(\lambda_B) = 1 - \frac{\Delta p_B}{p_H},$$

$$\tau(\lambda_B) = \pi(\lambda_B)^{\frac{k-1}{k}},$$

$$\lambda_B = \sqrt{\left[1 - \tau(\lambda_B)\right]^{\frac{k+1}{k-1}}},$$

$$q(\lambda_B) = \lambda_B \tau(\lambda_B)^{\frac{1}{k-1}} \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}}.$$

3. Определяется массовый расход топлива:

$$G_{\text{т.ч}} = 3,6 G_T \rho,$$

где G_T – измеренный расход топлива, ρ – плотность топлива при измеренной температуре топлива (t_m). Плотность определяется по формуле:

$$\rho = 976 - 0,7 T_m.$$

4. Удельный расход топлива (в кг/кН·ч) определяется косвенным путем:

$$C_{\text{уд}} = \frac{G_{\text{т.ч}}}{P}.$$

5. Суммарная степень повышения давления

$$\pi_{\text{к}\Sigma} = \frac{p_{\text{кВД}}^*}{p_H}.$$

6. Степень повышения давления в вентиляторе второго контура

$$\pi_{в||} = \frac{p_{кнд}^*}{p_H}$$

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

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

$$p_H = 101,325 \text{ кПа}; T_H = 288,16 \text{ К.}$$

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

$$n_{пр} = n_{изм} \sqrt{\frac{288,16}{T_H^*}} \bar{n}; P_{пр} = P_{изм} \frac{101,325}{p_H} \bar{P};$$

$$p_{пр} = p_{изм} \frac{101,325}{p_H} \bar{p}; T_{пр}^* = T_{изм}^* \frac{288,16}{T_H^*} \bar{T};$$

$$G_{в пр} = G_{в изм} \frac{101,325}{p_H} \sqrt{\frac{T_H^*}{288,16}} \bar{G}_в;$$

$$G_{m пр} = G_{m изм} \frac{101,325}{p_H} \sqrt{\frac{288,16}{T_H^*}} \bar{G}_m;$$

$$C_{уд пр} = \frac{G_{m пр}}{P_{пр}},$$

где \bar{n} , \bar{P} , \bar{T} , $\bar{G}_в$ и др. – поправочные коэффициенты, учитывающие отличие реального рабочего процесса в ТРДД от идеального, рассматриваемого в теории подобия при выводе этих формул. Проведенные исследования и опыт эксплуатации показывают, что для большинства современных двигателей при стендовых испытаниях в наземных условиях наиболее значима величина поправки на расход топлива. Остальные коэффициенты допустимо принять равными 1. Зависимость поправочного коэффициента \bar{G}_m от температуры окружающего воздуха и режима работы двигателя АИ-25 показана на рис. 6.3.

Отклонения от условий полного подобия вызываются изменением теплоемкости газа, газовой постоянной, числа Re, геометрических искажений в проточной части и других параметров, принятых при вы-

воде формул приведения постоянными. Чем значительнее изменение этих параметров, тем больше величина поправочных коэффициентов.

После приведения экспериментальных данных к САУ строится приведенная дроссельная характеристика двигателя. Пример такой характеристики показан на рисунке 6.2. Студенты при построении приведенной дроссельной характеристики используют стандартный лист миллиметровки, выделяют на нем поля. График выполняется карандашом.

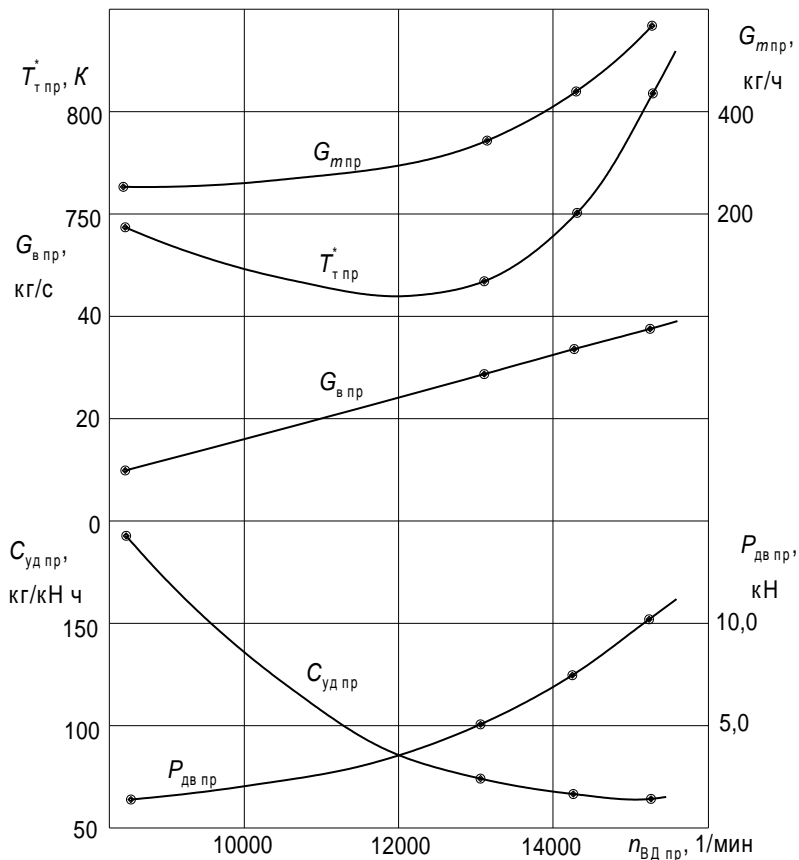


Рисунок 6.2 – Пример приведенной дроссельной характеристики ТРДД АИ-25 ($H=0, M=0$)

6.4 Определение нормальных значений параметров

Исходя из заданных значений тяги для максимального продолжительного и трех крейсерских режимов с приведенной дроссельной характеристики при $P_{пр} = P_{норм}$ снимаются нормальные значения других параметров двигателя ($n_{норм}$, $T_{норм}$, $G_{внорм}$, $G_{тнорм}$, $C_{уднорм}$). Схема определения нормальных значений параметров для одного из режимов показана на рисунке 6.1.

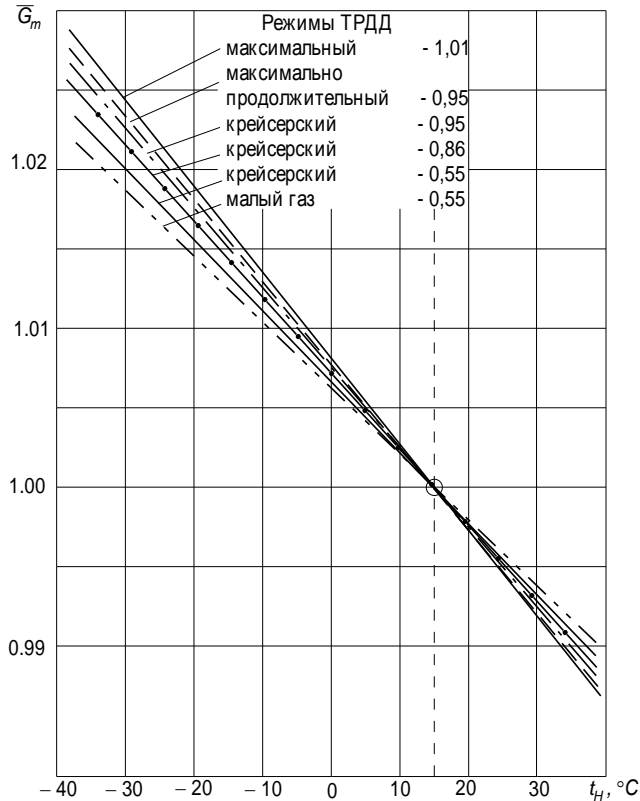


Рисунок 6.3 – Зависимость поправочного коэффициента к формуле приведения для расхода топлива АИ-25 от температуры t_H и $\bar{n}_{реж}$

7 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТРДД ПРИ РАБОТЕ НА ПОСТОЯННОМ РЕЖИМЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ АТМОСФЕРНЫХ УСЛОВИЯХ

Используя полученную при испытаниях приведенную дроссельную характеристику двигателя и заданный закон регулирования (зависимость частоты ротора турбокомпрессора на каждом режиме от атмосферных условий), можно определить изменение параметров двигателя на любом режиме при различных атмосферных условиях (p_H, T_H). Типичный закон регулирования ТРДД $n_{ВД\text{реж}} = f(T_H^*)$ показан на рис. 7.1.

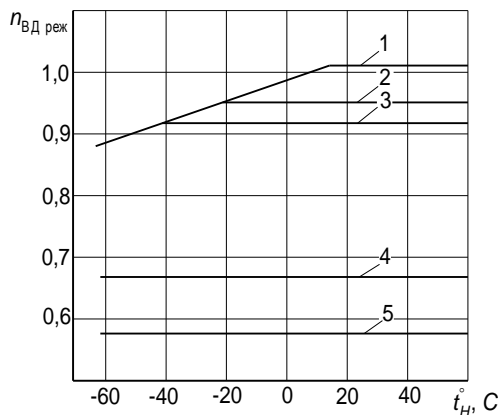


Рисунок 7.1 – Закон регулирования частоты вращения ТРДД АИ-25:

- 1 - взлетный режим; 2- максимальный продолжительный режим;
- 3, 4, 5 - крейсерский режим

Для определения, например, влияния температуры T_H на параметры ТРДД по выбранным значениям T_H находят по закону регулирования соответствующие частоты вращения на заданном режиме работы двигателя $\bar{n}_{\text{реж}i}$. Далее, вычисляется физическая частота вращения ротора ВД:

$$n_{ВД\text{реж}i} = n_{ВД\text{норм}} n_{ВД\text{реж}}$$

Полученные значения $n_{ВД}$ приводят по формуле приведения к САУ по параметрам на входе в двигатель:

$$n_{ВД \text{ пр } i} = n_{ВД \text{ реж } i} \sqrt{\frac{288,16}{T_H^*}},$$

где $T_{H i}^*$ - выбранное значение температур на входе в двигатель в градусах К. Таким образом определяют режим работы ТРДД в САУ, подобный работе при температуре T_H^* . Пользуясь приведенной дроссельной характеристикой по величине $n_{ВД \text{ пр } i}$ определяют значения соответствующих приведенных параметров ($G_{в \text{ пр}}$, $G_{т \text{ пр}}$ или $P_{пр}$ и т.д.). Затем, используя формулы приведения, пересчитывают найденные значения приведенных параметров в рассматриваемых атмосферных условиях. Таким образом, пользуясь дроссельной характеристикой ТРДД, измеренной в конкретных атмосферных условиях, можно определить влияние изменения атмосферных условий (p_H, T_H) на параметры данного ТРДД при заданном законе регулирования.

В лабораторной работе предлагается определить по полученной дроссельной характеристике зависимость $G_m = f(T_H)$ при $p_H = const = 101,325$ кПа на максимальном продолжительном или крейсерском режиме при четырех или пяти значениях температуры (например: -40, -20, 0, +20, +40 °С). Группа студентов из 2-3 человек рассчитывает зависимость для какого-то одного режима. По завершении строится график, соответствующий зависимости в координатах $G_m = f(T_H)$. Этот график выполняется на оборотной стороне миллиметровки с дроссельной характеристикой. Этот график выполняется на оборотной стороне миллиметровки с дроссельной характеристикой (рис. 7.2).

К отчету по работе студентами должны быть представлены следующие материалы:

1. Полностью оформленный бланк замеров с результатами испытания.
2. Качественно оформленный протокол испытания с результатами всех расчетов и определенными величинами нормальных значений параметров двигателя на основных режимах работы. Протокол с указанием даты испытания, атмосферными условиями испытания, подписывается студентами, оформившим его (см. Приложение 1).

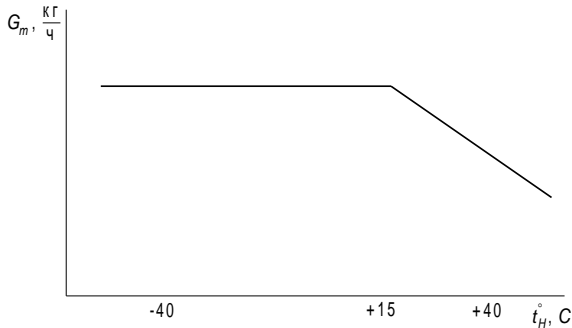


Рисунок 7.2 – Пример построения графика зависимости $G_m = f(t_H)$ на максимальном продолжительном режиме

3. График приведенной стендовой дроссельной характеристики с нанесенными экспериментальными точками режимов испытания и с указанием на характеристике нормальных значений параметров, соответствующих заданным в ТУ нормам тяги на каждом режиме.

4. График рассчитанной зависимости $G_m = f(T_H)$ при $p_H = const$ для одного из выбранных режимов.

5. Материалы в пп. 2, 3 и 4 предоставляются к отчету каждым студентом.

Зачет по лабораторной работе ставится при наличии у студента перечисленных выше материалов проводится по результатам собеседования. Основные контрольные вопросы для подготовки к зачету приведены ниже.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назначение автоматизированной системы испытаний (АСИ).
2. Особенности препарирования ТРДД АИ-25 на учебном автоматизированном испытательном стенде.
3. Основные элементы автоматизированной системы.
4. Какие погрешности возникают при преобразовании сигнала в АЦП?
5. Какие преимущества дает использование АСИ при проведении испытаний двигателя?
6. Назначение ЦАП и АЦП в устройстве связи ПЭВМ с объектом исследования.
7. С какой целью используется коммутатор в АЦП?
8. Как формируется алгоритм определения расчетных параметров на примере определения экспериментального значения приведенного расхода топлива?
9. Какие виды программ используются в АСИ?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Компанец, В.К. Технические средства АСНИ ГТД на базе КАМАК и микроЭВМ / В.К. Компанец, О.Д. Скобелев. – Куйбышев: КуАИ, 1983. – 90 с.
2. Кузьмичёв, Д.Д. Автоматизация экспериментальных исследований. / [Кузьмичёв Д.Д. и др.]. – М.: Наука, 1983. – 393 с.
3. Электрические измерения неэлектрических величин. / – 5-е изд. / под ред. П.В. Новицкого. – Л.: Энергия, 1975. – 576 с.
4. Лабораторный практикум по теории и испытаниям ВРД: учеб. пособие / В.А Григорьев, Ю.А Кныш [и др.]. – Самара: СГАУ, 2007. – 223 с.
5. Крамарухин, Ю.Е. Приборы для измерения температуры. / Ю.Е. Крамарухин. – М.: Машиностроение, 1990. – 208 с.
6. Обработка и анализ информации при автоматизированных испытаниях ГТД / Р. И. Адгамов, В. О. Боровик, С. В. Дмитриев [и др.]. – М.: Машиностроение, 1987. – 216 с.
7. Автоматизация испытаний и научных исследований ГТД: учеб. пособие / В.А. Григорьев, С.К. Бочкарев, А.В. Лапшин [и др.]. – Самара: СГАУ, 2007. – 136 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

ПРИМЕР ЗАПОЛНЕНИЯ ПРОТОКОЛА ИСПЫТАНИЙ к лабораторной работе №3 по курсу «ИСПЫТАНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ»

1. Задание

Снять дроссельную характеристику и определить нормальные значения параметров ТРДД на максимальном продолжительном и трех крейсерских режимах.

По результатам эксперимента построить графики:

$$P_{\text{пр}}, G_{m \text{ пр}}, G_{\text{в пр}}, T_{\text{Т}}^*, G_m = f(T_H) \text{ и } C_{\text{уд пр}} = f(n_{\text{ВД пр}})$$

2. Краткая методика эксперимента

Описываются последовательность основных этапов эксперимента и проводимые измерения.

3. Экспериментальная установка и ее данные.

Кратко описывается объект испытания, испытательный станок и стендовая система измерения.

4. Протокол N.

Топливо: керосин ТС-1.

Масло: МК-8.

5. Атмосферные условия.

$$p_H = p_B = 100,4 \text{ кПа}, T_H = T_B^*.$$

6. Таблица протокола.

6.1 Результаты измерений дроссельной характеристики

№ режима	$n_{\text{ВД}}, \%$	$n_{\text{НД}}, \%$	$P, \text{кН}$	$\Delta p_{\text{В}}, \text{кПа}$	$p_{\text{кНД}}^*, \text{кПа}$	$p_{\text{кВД}}^*, \text{кПа}$	$p_{\text{С}}^*, \text{кПа}$	$T_{\text{В}}^*, \text{К}$	$T_{\text{кНД}}^*, \text{К}$	$T_{\text{К}}^*, \text{К}$	$T_{\text{Т}}^*, \text{К}$	$G_m, \text{л/с}$	$T_{\text{С}}^*, \text{К}$	$t_m, \text{К}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	54,4	29,6	1,2	1,1	108,4	175,4	205,4	306	315	357	713	0,0774	753	305

6.2 Первичная обработка результатов измерений

$n_{ВД}$, мин ⁻¹	$n_{НД}$, мин ⁻¹	$\pi(\lambda_B)$	$q(\lambda_B)$	G_B , кг/ч	$G_{т.ч}$, кг/ч	$C_{уд}$, кг/кНч	π_k^*	$\pi_{ВП}^*$
16	17	18	19	20	21	22	23	24
9052	3505	0,9890	0,2182	12,9	213,9	178,2	1,75	1,08

6.3 Приведение измеренных параметров ДХ к САУ по параметрам на входе в двигатель

$n_{ВД пр}$, мин ⁻¹	$n_{НД пр}$, мин ⁻¹	$T_{кНД пр}^*$, К	$T_{К пр}^*$, К	$T_{Т пр}^*$, К	$P_{пр}$, кН	$G_B пр$, кг/ч	$G_{т.пр}$, кг/ч	$C_{уд пр}$, кг/кНч
25	26	27	28	29	30	31	32	33
8784	3401	296,6	336,2	671,4	1,21	13,42	209,5	172,96

6.4 Определение нормальных значений параметров на заданном режиме

Режим	$P_{норм}$, кН	$n_{ВД норм}$, мин ⁻¹	$n_{ВД норм}$, мин ⁻¹	$T_{Т норм}^*$, К	$G_B норм$, кг/с	$G_{т норм}$, кг/ч	$C_{уд норм}$, кг/кНч
34	35	36	37	38	39	40	41
макс. пр	7	14987	8312	697	32,64	415,1	68,46

6.5 Определение зависимости $G_T = f(T_H)$ на заданном режиме

t_H , °С	T_B^* , К	$n_{ВД реж}$, %	$n_{ВД реж}$, мин ⁻¹	$n_{ВД пр}$, мин ⁻¹	$G_{т пр}$, кг/ч	$G_{т}$, кг/ч	$G_{т.ч}$, кг/ч
42	43	44	45	46	47	48	49
+20	326	54,4	3505	3295	203,0	1,025	213,9

7. Схема установки и основные формулы

По согласованию с преподавателем выполняется схема двигателя или испытательного станка, приводятся основные расчетные формулы, и схема определения нормальных значений параметров ТРДД.

Учебное издание

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ИСПЫТАНИЯ
ДВУХКОНТУРНОГО ТУРБОРЕАКТИВНОГО
ДВИГАТЕЛЯ АИ-25**

Методические указания к лабораторной работе

Составители: *Григорьев Владимир Алексеевич и др.*

Самарский национальный
исследовательский университет
443086 Самара, Московское шоссе, 34.
