

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЁВА»

**Исследование рабочих процессов и энергетических  
характеристик двигателя внутреннего сгорания**

*Методические указания к лабораторным работам*

Самара 2017

Авторы:  
**Горшкалев Алексей Александрович,**  
**Корнеев Сергей Сергеевич,**  
**Угланов Дмитрий Александрович,**  
**Урлапкин Виктор Викторович,**  
**Шиманов Артём Андреевич**

Рецензент: д-р техн. наук, проф. каф. автоматических систем энергетических установок, А.А. Иголкин

**Исследование рабочих процессов и энергетических характеристик двигателя внутреннего сгорания:** Методические указания к лабораторным работам / А.А. Горшкалев, С.С. Корнеев, Д.А. Угланов, В.В. Урлапкин, А.А. Шиманов; Самар. ун-т– Самара, 2017. – 42 с.: ил.

Настоящие методические указания к лабораторным работам предназначены для студентов «Института двигателей энергетических установок» Самарского университета.

В методических указаниях приведены сведения о малоразмерном двухтактном бензиновом двигателе внутреннего сгорания с искровым зажиганием. Подробно описан состав стенда, приведена информация об измерительном оборудовании. Приведена методика определения эффективной мощности двигателя, часового и удельного эффективного расхода топлива. Подробно описана последовательность действий при выполнении лабораторных работ.

Пособие (Методические указания) предназначено для студентов, обучающихся по следующим направлениям подготовки бакалавра: 13.03.03 – Энергетическое машиностроение, 15.03.04 - Автоматизация технологических процессов и производств. 15.03.05 - Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств, 24.03.05 – Двигатели летательных аппаратов; по специальности 24.05.02 – Проектирование авиационных двигателей и энергетических установок, по направлению подготовки магистров 24.04.05 - Двигатели летательных аппаратов, а также может быть полезно слушателям курсов, аспирантам и специалистам.

Подготовлено на кафедре теплотехники и тепловых двигателей Самарского университета.

© Самарский государственный аэрокосмический университет, 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

Определения, обозначения и сокращения .....	5
Введение.....	8
Техника безопасности и противопожарные меры при выполнении лабораторных работ .....	9
1 Объект испытаний – авиационный поршневой модельный двигатель ..	11
1.1 Основные технические данные двигателя.....	11
1.2 Описание конструкции двигателя Evolution 20GX2 .....	11
1.3 Параметры воздушных винтов .....	13
2 Стенд для испытания малоразмерного поршневого авиационного ДВС	15
2.1 Описание структуры стенда.....	15
2.2 Измерительная аппаратура стенда .....	16
3 Классификация характеристик двигателей внутреннего сгорания .....	19
4 Лабораторная работа №1 «Характеристика по составу смеси» .....	21
5 Лабораторная работа №2 «Внешняя скоростная характеристика» .....	33
6 Лабораторная работа №3 «Дроссельная характеристика» .....	40

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

$N_e$  - эффективная мощность, кВт

$M_{кр}$  - крутящий момент, Н·м

$n$  - частота вращения, об/мин

$D, S$  - диаметр, ход поршня, мм

$V_h$  - рабочий объем цилиндра, см<sup>3</sup>

$g_e$  - эффективный удельный расход топлива, кг/кВт·ч

$\varepsilon$  - степень сжатия,

$\alpha$  - коэффициент избытка воздуха,

$\varphi_{оз}, \varphi_{кв}$  - угол опережения зажигания, поворота КВ, град

$G_B$  - расход воздуха, кг/ч

$G_T$  - расход топлива, кг/ч

$\rho_B, \rho_T, \rho_K$  - плотность воздуха, топлива, за компрессором, кг/м<sup>3</sup>

$p$  - давление, Па

$T$  - температура, К

$V_m$  - мерный объем, мл

$\tau$  - тактность ДВС, длительность замера, с

$L_0$  - стехиометрический коэффициент, кмоль возд/кг топл.

$\eta_v$  - коэффициент наполнения,

$\eta_i, \eta_e$  - КПД индикаторный, эффективный,

$H_u$  - низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг

$R$  - газовая постоянная, Дж/(кг·град)

$L_i, L_{сж}, L_p$  - работа индикаторная, сжатия, расширения, Дж

$Q_1$  - тепло подведенное в цикл, Дж

$n_1, n_2$  - показатель политропы, сжатия, расширения,

### Индексы

$e$  - эффективный

$T$  - топливо

$i$  - индикаторный

$B$  - воздух

$h$  - цилиндра (рабочий объем)

$mech$  - механический

h- двигателя (рабочий объем)

кв- коленвал

0- начальный

opt-оптимальный

к- за компрессором

### Сокращения

КШМ- кривошипно- шатунный механизм

КПД- коэффициент полезного действия

ДВС- двигатель внутреннего сгорания

ДсИЗ- двигатель с искровым зажиганием

ТВС- топливовоздушная смесь

ВСХ- внешняя скоростная характеристика

### **Цель лабораторных работ:**

1. Знакомство с испытательным стендом, его оборудованием и системами, методами экспериментального получения характеристик поршневого авиационного ДВС.
2. Развитие у студентов навыков обработки и анализа информации, полученной при испытании натурального двигателя, с использованием сведений из лекционной части курса «Теория рабочих процессов ДВС».

### **Порядок проведения лабораторных работ:**

1. Ознакомление с правилами техники безопасности при испытании ДВС на учебном стенде.
2. Ознакомление с методикой и теорией проведения лабораторной работы.
3. Проверка готовности студентов к выполнению лабораторной работы. При подготовке к лабораторным работам требуется самостоятельное изучение соответствующих разделов лекционного курса.
4. Ознакомление с экспериментальным стендом, с объектом испытания - двигателем Evolution 20GX2 и его системами.
5. Проведение испытания с измерением основных параметров.
6. Обработка результатов испытания, оформление результатов испытания, оформление протокола, построение характеристик ДВС.
7. Анализ результатов испытания и сдача лабораторной работы преподавателю.

## ВВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум предназначен для студентов, обучающихся по направлению «Энергетическое машиностроение». Выполнение лабораторных работ по испытанию и снятию характеристик двигателей внутреннего сгорания выполняется с целью лучшего усвоения теоретических разделов дисциплины «Теория рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания».

Студенты получают знания, умения и навыки проведения диагностики и испытаний бензинового ДВС. Пособие направлено на выработку у студентов навыков проведения испытаний двигателей и способности к самостоятельному объективному анализу данных, получаемых при проведении испытаний.



## ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ И ПРОТИВОПОЖАРНЫЕ МЕРЫ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

В целях обеспечения безопасности при проведении испытаний двигателя студенты перед выполнением первой работы должны пройти инструктаж по технике безопасности и противопожарным мерам.

Инструктаж регистрируется в специальном журнале с личной подписью каждого студента о том, что он ознакомлен с правилами и обязуется их выполнять. Студенты, не прошедшие инструктаж, к выполнению практических заданий не допускаются.

При выполнении лабораторного практикума возможными источниками опасности могут быть:

- вращающиеся детали двигателя и стенда;
- ядовитые и легковоспламеняющиеся материалы, применяемые в системе питания и смазки двигателя;
- горячие детали выпускной системы и системы охлаждения двигателя;
- высокое напряжение в системе зажигания двигателя;
- электрическое напряжение в системе питания и управления стенда;
- токсичные отработавшие газы двигателя.

Студенты обязаны строго выполнять следующие правила по технике безопасности и противопожарным мерам:

1. Во избежание ожогов не следует касаться нагретых стенок выхлопных труб, коллекторов и др.;
2. При работе двигателя запрещается касаться вращающихся деталей или узлов;
3. Пуск двигателя можно производить только с разрешения преподавателя;
4. Категорически запрещается пользоваться открытым огнем, а также курить в помещении лабораторий;

5. Запрещается бесцельное включение приборов, измерительной аппаратуры, кнопочных пускателей и др., а также прикосновение ко всем токоведущим элементам исследовательского стенда;

6. При обнаружении неисправностей в работе механизмов систем двигателя, измерительной аппаратуре, при появлении посторонних стуков в приводных соединительных узлах следует немедленно доложить преподавателю, а при явно выраженной неисправности немедленно остановить двигатель и выключить всю аппаратуру;

7. В случае попадания топлива или масла на кожный покров следует смыть с кожи теплой водой с мылом.

# 1 ОБЪЕКТ ИСПЫТАНИЙ – АВИАЦИОННЫЙ ПОРШНЕВОЙ МОДЕЛЬНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

## 1.1 Основные технические данные двигателя

Основные технические данные представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические данные двигателя Evolution 20GX2.

Тип двигателя	Бензиновый одноцилиндровый, двухтактный
Диаметр цилиндра D	30,5 мм
Ход поршня S	27,9 мм
Рабочий объем $V_h$	20 см <sup>3</sup>
Диапазон частот вращения	1800 – 10000 об/мин
Топливо	Бензин, октановое число 87-91
Тип масла и состав	2-тактное масло, в соотношении 20:1 бензин/масло
Система зажигания	Электронное 4.8 – 8.4 В
Система охлаждения	Воздушная
Вес (без глушителя и системы зажигания) двигателя	708 грамм
Полный вес двигателя	958 грамм

## 1.2 Описание конструкции двигателя Evolution 20GX2

Карбюраторный двухтактный поршневой двигатель Evolution 20GX2 (рисунок 1) имеет следующие механизмы и системы:

- Кривошипно-шатунный механизм (КШМ) и детали цилиндропоршневой группы;
- Механизм газораспределения;
- Система охлаждения;
- Система питания и смазки;
- Система зажигания.



Рисунок 1 – Двигатель Evolution 20GX2

В кривошипно-шатунном механизме возвратно-поступательное движение поршня преобразуется во вращательное движение вала. Цилиндропоршневая группа и кривошипно-шатунный механизм включают в себя следующие детали: блок цилиндра, головка блока цилиндра с уплотняющей прокладкой, поршень, поршневые кольца, поршневой палец, шатун, коленчатый вал, картер двигателя.

Цилиндр с головкой блока цилиндра образуют объем, где осуществляется рабочий цикл двигателя; стенки цилиндра направляют движение поршня. В головке размещена камера сгорания.

Поршень представляет собой металлический стакан, установленный в цилиндре с некоторым зазором. В такте расширения он воспринимает давление газов.

Шатун передает усилие от поршня на коленчатый вал и вместе с валом преобразует возвратно-поступательное движение поршня во вращательное движение вала. Для увеличения прочности стержень шатуна имеет двутавровое сечение. Верхняя головка шатуна предназначена для установки поршневого пальца плавающего типа, шарнирно соединяющего шатун с

поршнем. Нижняя разъемная головка шатуна служит для его соединения с шатунной шейкой коленчатого вала.

Коленчатый вал воспринимает усилия от давления газов в цилиндре, действующие на поршень. Развиваемый на валу крутящий момент передается потребителю.

Механизм газораспределения служит для впуска в цилиндр свежей топливовоздушной смеси и выпуска отработавших газов в соответствии с фазами процессов газообмена рабочего цикла. В двигателе Evolution 20GX2 газообмен осуществляется благодаря впускному и выпускному окнам, расположенным в стенке цилиндра.

Смазка деталей двигателя осуществляется путем смешивания топлива с маслом в соотношении 20:1 бензин/масло.

Система охлаждения предназначена для отвода тепла от стенок цилиндра и головки блока. В двигателе Evolution 20GX2 охлаждение воздушное, осуществляется воздухом, отбрасываемым винтом двигателя.

Система питания предназначена для приготовления топливовоздушной смеси определенного состава, зависящего от режима работы двигателя и внешних условий. Топливная система двигателя снабжена карбюратором.

Система зажигания предназначена для воспламенения рабочей смеси, находящейся в цилиндре двигателя. Система зажигания состоит из источника низкого напряжения; катушки зажигания, преобразующей ток низкого напряжения в импульсы тока высокого напряжения для создания искрового разряда между электродами свечи. Свеча зажигания установлена вертикально в головке блока.

### 1.3 Параметры воздушных винтов

Воздушные винты служат в качестве нагрузки двигателя при его испытании. С их помощью замеряют максимальные крутящие моменты, развиваемые двигателем при различной скорости вращения. Для этого двигатель испытывают с различными винтами.



Рисунок 2 – Серия винтов авиамодельного двухтактного двигателя

Рекомендуется испытание двигателя начинать с винтом, развивающим наименьшее число оборотов. На рисунке 2 представлен двухлопастной винт для испытания двигателя Evolution 20GX2. Воздушные винты имеют следующие параметры:

винт №1 (16x6), диаметр  $D = 406,4$  мм, шаг  $H = 152,4$  мм;

винт № 2 (15x6), диаметр  $D = 381$  мм, шаг  $H = 152,4$  мм;

винт № 3 (14x6), диаметр  $D = 355,6$  мм, шаг  $H = 152,4$  мм;

винт № 4 (13x6), диаметр  $D = 330,2$  мм, шаг  $H = 152,4$  мм;

винт № 5 (11x6), диаметр  $D = 279,4$  мм, шаг  $H = 152,4$  мм.

## 2 СТЕНД ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ МАЛОРАЗМЕРНОГО ПОШНЕВОГО АВИАЦИОННОГО ДВС

### 2.1 Описание структуры стенда

Для проведения испытаний одноцилиндрового 2-тактного ДВС Evolution 20GX2 применяется стенд (см. рис. 3), созданный на кафедре теплотехники и тепловых двигателей в Самарском национальном исследовательском университете имени академика С.П. Королева. Стенд предназначен для определения эффективных параметров двигателя и изучения влияния на них различных факторов.

Двигатель для испытаний на стенде устанавливается на подmotorной раме, которая закреплена на подвижных опорах, позволяющих перемещаться ей в двух степенях свободы - вращаться по оси коленчатого вала и в горизонтальной плоскости перпендикулярно оси двигателя. Так же на стенд устанавливаются два динамометра (ДОР-3-0,1И), которые ограничивают вышеуказанные степени свободы и во время испытаний позволяют измерить значения крутящего момента и тяги винта. Для определения частоты вращения может быть использован оптический тахометр, световой луч которого направляется на специальный светоотражающий элемент, наклеенный на одну лопасть винта двигателя. Для определения массового расхода топлива используются лабораторные весы.



Рисунок 3 – Испытательный стенд

Система вентиляции позволяет удалять выхлопные газы из помещения. Система содержит магистраль отвода продуктов сгорания. Для поддержания в боксе нормальной рабочей температуры (18-27°C) и вентиляции помещения установлены два компрессора - вытяжной и приточный.

## 2.2 Измерительная аппаратура стенда

В данном разделе приведено измерительное оборудование, подобранное с учетом конструкции и всех требований для испытательного стенда двигателей внутреннего сгорания малой мощности.

### **Тахометр оптический Testo 465**

Предназначен для определения бесконтактным методом частоты вращения подвижных частей механизмов и деталей машин в процессе их работы.

В принцип работы оптического тахометра Testo (рисунок 4) заложен бесконтактный метод измерения частоты вращения подвижных механизмов, который заключается в излучении светового луча и приеме отраженного луча от светоотражающей метки, прикрепленной к вращающейся части механизма.



Последовательность отраженных световых импульсов преобразуется в серию электрических сигналов, которые транслируются программой контроллера в значения «об/мин» и отображаются в количественном значении на дисплее тахометра.

Тахометры данного типа нашли широкое применение в различных отраслях промышленности, таких как машиностроение, энергетика, металлургия, железнодорожный транспорт, коммунальное хозяйство и медицина.



Рисунок 4 – Тахометр

### **Динамометр растяжения электронный 3-го разряда серии ДОР-3-И**

Динамометры растяжения серии ДОР-3 предназначены для измерения статической и динамической силы растяжения, (позволяют фиксировать пиковое (максимальное) значение прилагаемых усилий). Зарегистрированы в ГОСРЕЕСТРЕ РФ под № 27202-04.

Динамометры (рисунок 5) могут использоваться в испытательных стендах и установках.

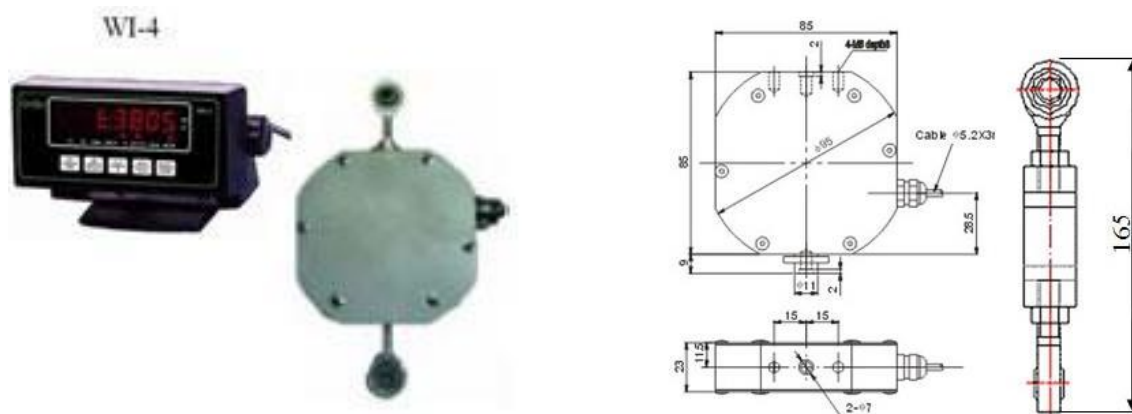


Рисунок 5 – Динамометр растяжения ДОР-3-И

Динамометры представляют собой тензометрический датчик, соединенный кабелем связи с электронным измерительным индикатором.

Отсчет показаний динамометров ведется: для нагрузки до 1 кН в единицах Н, свыше 1 кН в единицах кН.

Функциональные особенности весового индикатора ВИ-4 (WI-4):

- Легкое и простое использование;
- Большой светодиодный дисплей;
- Состоит из 7 цифр;
- Режим переключения между единицами измерения;
- Весы имеют 2 единицы измерения: кг и кН;
- Индикатор имеет интерфейс RS-232;
- Интерфейс предназначен для подключения принтера и компьютера;
- Компенсация массы тары во всем диапазоне взвешивания;
- Режим фиксирования пикового значения массы;
- Предназначен для фиксирования показаний пикового значения массы на дисплее индикатора;
- Режим контроля веса;
- Позволяет контролировать вес груза на соответствие установленным нижним и верхним уровнем массы;
- Режим суммирования;
- Автоматический и ручной режим суммирования;
- Весовой терминал можно закрепить на стол или к стене;
- Питание индикатора осуществляется от сети.

### 3 КЛАССИФИКАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Условия эксплуатации транспортных средств диктуют необходимость частых изменений режимов движения. Поэтому двигатели обычно работают на установившихся режимах лишь короткие промежутки времени, часто переходя с одного режима на другой, причём скоростные и нагрузочные режимы могут изменяться независимо друг от друга. Это означает, что при любой частоте вращения коленчатого вала двигателя (от минимально устойчивой до максимальной) нагрузка двигателя может также изменяться от нулевой до максимальной.

Для определения динамических и экономических показателей, а также оценки регулировочных параметров проводятся стендовые испытания двигателей. Испытания проводятся в соответствии с действующими нормативными документами и ГОСТами.

На показатели работы двигателя одновременно воздействует большое число факторов, учесть совместное влияние которых практически невозможно. Поэтому испытания проводят при задании некоторых неизменных условий (постоянный скоростной режим двигателя, постоянное положение органа управления подачей топлива и т.п.).

Результаты испытаний принято представлять в виде графической зависимости параметров.

**Характеристикой двигателя** называется графическая зависимость одного или нескольких параметров работы двигателя от некоторого фактора (параметра), выбираемого в качестве независимого и непосредственно изменяемого экспериментатором в ходе испытаний.

Название и вид характеристики определяется независимой переменной, в качестве которой выбирается один из эксплуатационных или конструктивных факторов (частота вращения коленчатого вала, мощность, расход топлива, угол опережения зажигания (впрыска), коэффициент избытка воздуха и др.). В зависимости от того, какой параметр является

независимой переменной и задаётся экспериментатором при проведении испытаний, характеристики двигателя делят на **три основные группы: скоростные, нагрузочные и специальные.**

В характеристиках первой группы, независимая переменная – частота вращения коленчатого вала двигателя; скоростные характеристики снимаются как при полной, так и при частичной открытой дроссельной заслонке. Наибольший интерес представляет скоростная характеристика, получаемая при полностью открытой дроссельной заслонке; она называется **внешней** и показывает, какие наибольшие значения мощности и крутящего момента может развивать двигатель при различных частотах вращения коленчатого вала и какой при этом будет часовой и удельный расход топлива.

В характеристиках второй группы независимая переменная – нагрузка на коленчатом валу двигателя. Нагрузка при испытаниях задаётся углом открытия дроссельной заслонки (для карбюраторных двигателей) или перемещением рычага управления подачей топлива насоса высокого давления (для дизелей). Нагрузка характеризуется значениями эффективной мощности, среднего эффективного давления или эффективного крутящего момента. Нагрузочная характеристика позволяет судить об экономичности двигателя на наиболее часто встречающихся в эксплуатации режимах работы двигателя (с неполной нагрузкой).

Характеристики третьей группы разнообразны и снимаются с двигателя для выбора оптимальных условий его работы, широко применяются при проведении научно-исследовательских работ.

В качестве зависимых переменных обычно принимаются эффективная мощность, крутящий момент, часовой и удельный расходы топлива.

## 4 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1 «ХАРАКТЕРИСТИКА ПО СОСТАВУ СМЕСИ»

**Цель работы:** Получение характеристики по составу смеси производится для выявления регулировки карбюратора на мощностные и экономические показатели работы двигателя, а также для установки оптимальной регулировки карбюратора на испытуемом режиме работы двигателя.

### Общие сведения о характеристике

**Характеристика по составу смеси это зависимость основных показателей работы двигателя от коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  при постоянных частоте вращения вала и положении дроссельной заслонки, а также оптимальной величине угла опережения зажигания на каждом режиме работы.**

Эта характеристика может быть использована при проектировании и настройке органов регулирования топливной системы для обеспечения оптимальной работы двигателя на разных режимах.

Напомним, что коэффициент  $\alpha$  показывает насколько состав реальной топливовоздушной смеси (ТВС) по количеству воздуха отличается от теоретически необходимого количества  $L_0$  для полного сгорания 1 килограмма топлива. Постоянные значения  $n$  об/мин и положения дросселя обеспечивают постоянный расход воздуха  $G_B = \text{const}$ . Следовательно, изменить величину возможно только за счёт изменения расхода топлива  $G_T$ . Поэтому характеристику по составу смеси при испытании карбюраторного двигателя получают либо установкой топливных жиклёров разной пропускной способности, либо регулировкой проходного сечения главного топливного жиклёра (обычно с помощью профилированной иглы).

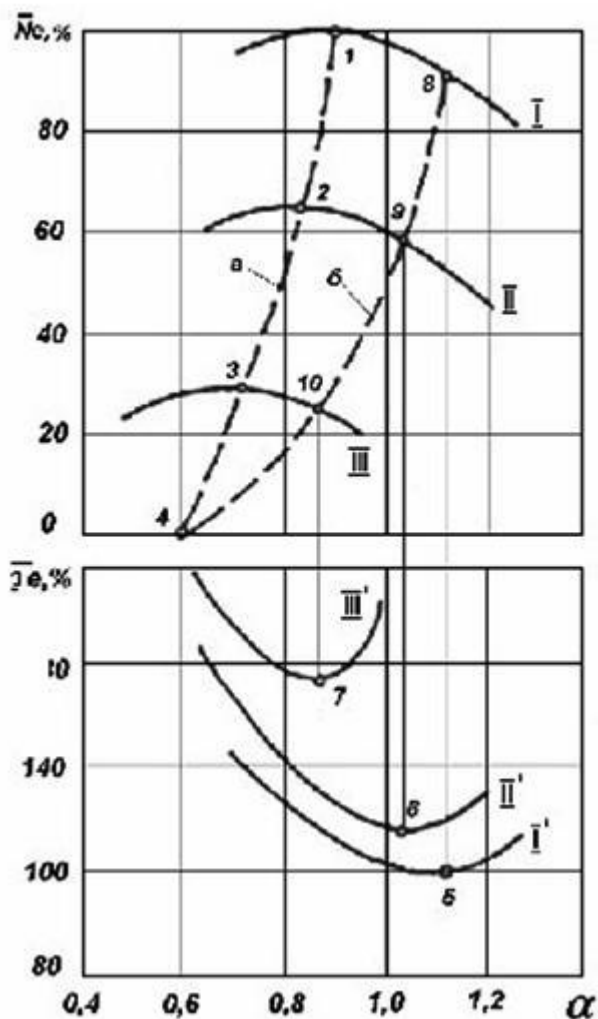


Рисунок 6 – Характеристика ДсИЗ по составу ТВС

$$\alpha = \frac{G_B}{G_m \cdot L_0}$$

При испытании двигателя с впрыском топлива регулируется величина его цикловой подачи. Экспериментальные данные показывают, что характеристика по составу смеси ДсИЗ, т.е.  $N_e, g_e = f(\alpha)$ , имеет вид, изображённый на рис.6. Здесь по оси ординат отложены удельный расход топлива в процентах от минимального его значения и эффективная мощность двигателя, выраженная в процентах от максимальной мощности, получающейся при данной частоте вращения вала и полностью открытой дроссельной заслонке. Кривые I и I' соответствуют работе двигателя при полностью открытой дроссельной заслонке; кривые II и II', III и III' - работе при частично открытой дроссельной заслонке. Из графика видно, что коэффициент избытка воздуха, соответствующий максимальной мощности

(точки 1, 2, 3), меньше коэффициента  $\alpha$ , при котором обеспечивается наименьший удельный расход топлива (точки 5, 6, 7), т.е. при максимальной экономичности двигателя.

Максимальная мощность при всех положениях дроссельной заслонки получается при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha$ , меньшем единицы. С переходом на работу с прикрытой дроссельной заслонкой коэффициент  $\alpha$ , соответствующий режиму максимальной мощности, уменьшается. При полном открытии дроссельной заслонки наименьший удельный расход топлива, т.е. наиболее экономичная работа двигателя, соответствует несколько обеднённой смеси ( $\alpha = 1,1$ ). С прикрытием дроссельной заслонки коэффициент избытка воздуха, соответствующий наиболее экономичной работе, уменьшается и при значительном прикрытии становится меньше единицы. Таким образом, с прикрытием дроссельной заслонки ТВС как для получения максимальной мощности, так и для получения максимальной экономичности должна обогащаться. Если соединить на кривых I, II и III точки 1,2 и 3, соответствующие максимальной мощности, и точки 8,9,10, характеризующие работу двигателя на наиболее экономичных режимах, то получим две дополнительные линии: кривую а, соответствующую регулировке карбюратора на максимальную мощность, и кривую б, соответствующую регулировке карбюратора на максимальную экономичность. Область, заключённая между этими двумя кривыми, и является той областью значений коэффициента  $\alpha$ , в которой целесообразна регулировка карбюратора. Вне этой области регулировка карбюратора нецелесообразна, т.к. одновременно понижается мощность двигателя и ухудшается его экономичность.

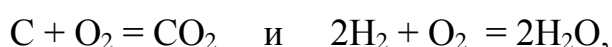
В зависимости от назначения и условий работы двигателя регулировкой карбюратора можно обеспечить получение смеси, состав которой приближается к составу, характеризующему кривой а или кривой б. Точка 4 соответствует коэффициенту избытка воздуха на режиме холостого хода двигателя.

Физический смысл появления двух характерных составов ТВС (на максимальную мощность и на максимальную экономичность) связан с особенностями организации протекания процесса горения.

При  $\alpha = 1$  соотношение расходов воздуха и топлива через систему подготовки ТВС строго равно теоретически необходимому

$$\frac{G_B}{G_m} = L_0$$

Но величина  $L_0$  рассчитывается по стехиометрическим уравнениям химических реакций



в которых совершенно не учитываются реальные условия подготовки ТВС и её горения. В представленном уравнении по умолчанию предполагается, что весь объём ТВС уже идеально подготовлен и топливо представляет собой смесь углерода и водорода. На самом деле топливо - это смесь молекул различных углеводородов, причём в реальных условиях в различных участках объёма ТВС соотношение кислорода, углерода и водорода может заметно отличаться от какого-то среднего значения. Кроме того, некоторая часть топлива может ещё находиться в жидком, а не в парообразном состоянии. Всё это приводит к тому, что в реальных условиях подготовки и горения ТВС, соотношение  $\alpha = 1$  оказывается недостаточным для максимально возможного преобразования ТВС в продукты сгорания и эта задача может быть решена лишь при некотором избытке воздуха над теоретически необходимым. Как показывает опыт, при  $\alpha \approx 1,1$ .

Академик Б.С. Стечкин показал, что для конкретного двигателя, имеющего определённую степень сжатия, форму камеры сгорания и размеры цилиндра, индикаторный КПД зависит только от состава ТВС:

$$\eta_i = \text{const } \eta_\alpha,$$

где  $\eta_\alpha$  - коэффициент состава смеси, характеризующий степень использования энергии, введённой в двигатель с топливом. Этот коэффициент показывает относительное изменение  $\eta_i$  при переходе от



теоретического состава ТВС ( $\alpha = 1$ ) к какому-либо другому. Для всех углеводородных топлив изменение  $\eta_\alpha$  по  $\alpha$  примерно одинаково (см. рис.7). Видно, что коэффициент  $\eta_\alpha$  достигает максимума при  $\alpha \approx 1,1$ .

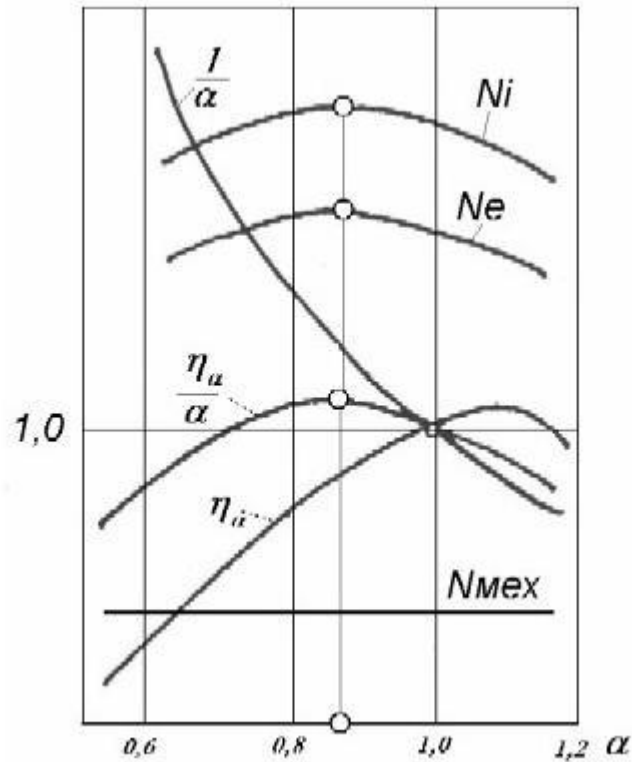


Рисунок 7 – Причины появления состава ТВС на максимальную экономичность

$$\eta_\alpha = \frac{\eta_i}{\eta_{i(\alpha=1)}}$$

**Состав смеси на максимальную мощность** формально можно пояснить тем, что с уменьшением коэффициента избытка воздуха (при  $G_B = const$ ) расход топлива

$$G_m = \frac{G_B}{\alpha L_0} = \frac{const}{\alpha}$$

увеличивается обратно пропорционально  $\alpha$  (см. рис.7), индикаторный КПД снижается в соответствии с

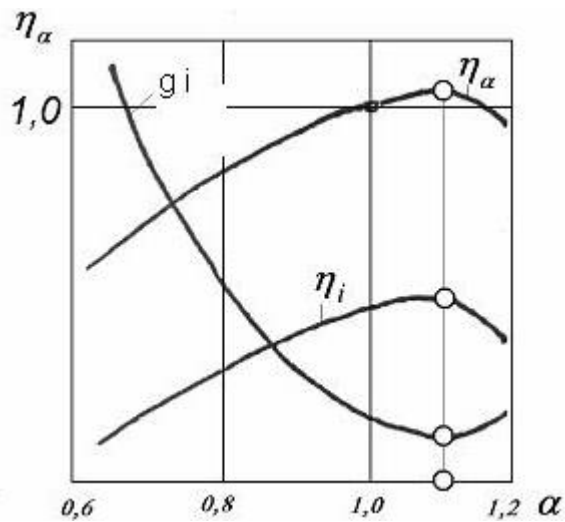


Рисунок 8 – Причины появления ТВС на максимальную мощность  
В результате индикаторная мощность двигателя

$$N_i = \frac{H_u}{\alpha \cdot L_0} \cdot V_H \cdot \eta_v \cdot \rho_k \cdot \frac{n}{30 \cdot \tau} \cdot \eta_i$$

а при  $\frac{H_u}{\alpha \cdot L_0} \cdot V_H \cdot \eta_v \cdot \rho_k \cdot \frac{n}{30 \cdot \tau} = const$  (по условиям получения характеристики)

зависит от количества подведённого топлива ( $\alpha$ ) и качества его использования ( $\eta_\alpha$ ), т.е.

$$N_i = const \frac{\eta_\alpha}{\alpha}.$$

Вид этой зависимости приведён на рис. 8. Эффективная мощность меньше индикаторной на постоянную величину  $N_{мех}$  (при  $n = const$ ):

$$N_e = N_i - N_{мех}.$$

К сказанному следует добавить, что в появлении и этой отличительной точки характеристики по составу смеси нашли своё отражение особенности протекания процесса горения.

Напомним, что мощность двигателя  $N_e$  [Дж/с] - это количество работы [Дж], которое он способен совершить в единицу времени. Следовательно, с одной стороны,  $N_e$  зависит от работоспособности рабочего тела двигателя, а с другой стороны, от скорости, с которой преобразуется энергия при совершении термодинамического цикла.

Работоспособность  $RT$  [Дж/кг] смеси газов, совершающих в процессе расширения полезную работу, изменяется по  $\alpha$  так, как это показано на рис.9. То, что максимум температуры в процессе горения получается при  $\alpha = 1$  (или чуть меньше 1), объясняется двумя действующими факторами. При  $\alpha > 1$  с увеличением  $\alpha$  всё большая доля тепла, выделившегося при сгорании стехиометрической ( $\alpha = 1$ ) ТВС, расходуется на подогрев избыточного воздуха, что снижает общую температуру смеси газов.

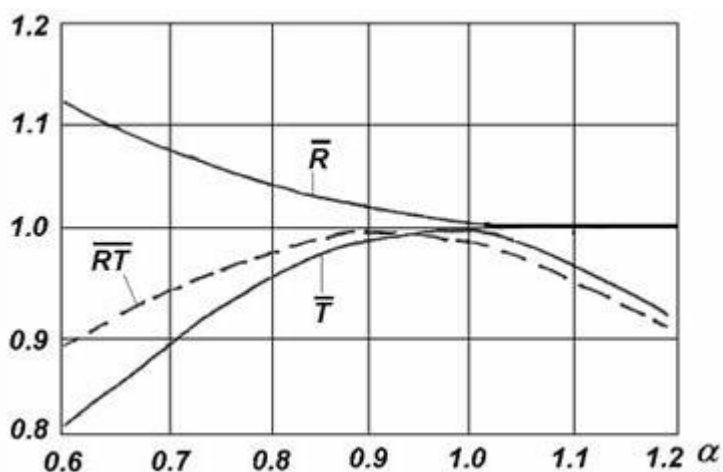


Рисунок 9 – Влияние состава ТВС на работоспособность продуктов сгорания

При  $\alpha < 1$  с уменьшением  $\alpha$  из-за недостатка одного из реагентов (воздуха) общее выделение тепла при горении становится всё меньше и меньше. Рост газовой постоянной  $R$  при снижении  $\alpha$  связан с изменением состава продуктов сгорания. При  $\alpha \geq 1$  теоретически в состав рабочего тела кроме азота входят молекулы трёхатомных газов  $H_2O$  и  $CO_2$ . При  $\alpha < 1$  к ним добавляется некоторое количество продуктов неполного сгорания:  $CO$  и  $H_2$ . Поскольку газовая постоянная смеси связана с универсальной газовой постоянной  $R_\mu = 8314,33$  [Дж/кг] через молекулярную массу  $\mu$  продуктов сгорания:

$$R = R_\mu / \mu,$$

то очевидно, что с появлением в смеси  $CO$  и  $H_2$  её молекулярная масса уменьшается и  $R$  растёт. В результате работоспособность рабочего тела двигателя получается максимальной при  $\alpha < 1$ .

На этот эффект накладывается и зависимость от  $\alpha$  скорости преобразования химической энергии веществ, входящих в состав ТВС, в теплоту химических реакций. Дело в том, что скорость распространения пламени (и ламинарного  $U_n$ , и турбулентного  $U_T$ ) в смесях воздуха с углеводородными энергоносителями зависит от состава ТВС так, что её максимум достигается при  $\alpha \approx 0,85...0,9$  (см. рис.10 и 11). В сочетании с максимумом  $RT$  это и объясняет характер зависимостей  $N_i$ ,  $N_e$  от  $\alpha$  (см. рис.7).

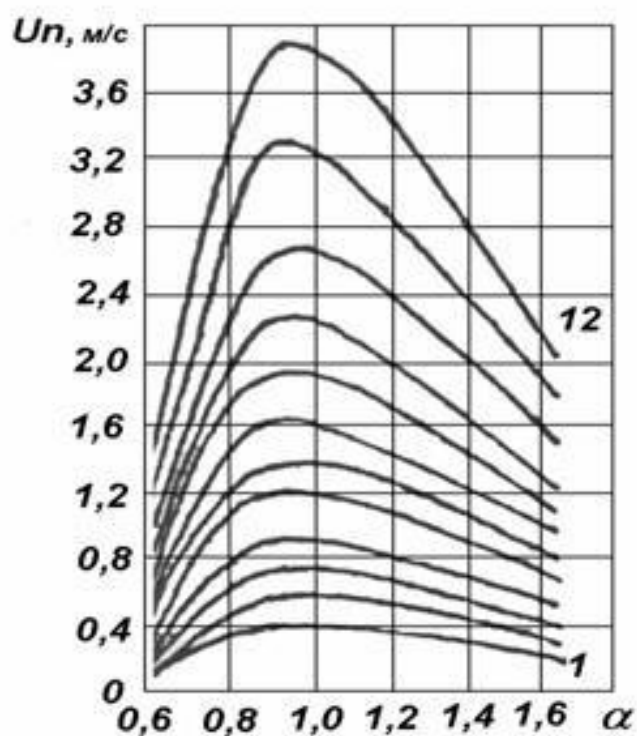


Рисунок 10-Нормальная скорость распространения пламени в бензо-воздушной смеси при различных начальных температурах (от  $T_c = 323\text{ K}$  – линия 1, до  $T_c = 873\text{ K}$  - линия 12, с шагом  $50\text{ K}$ ).

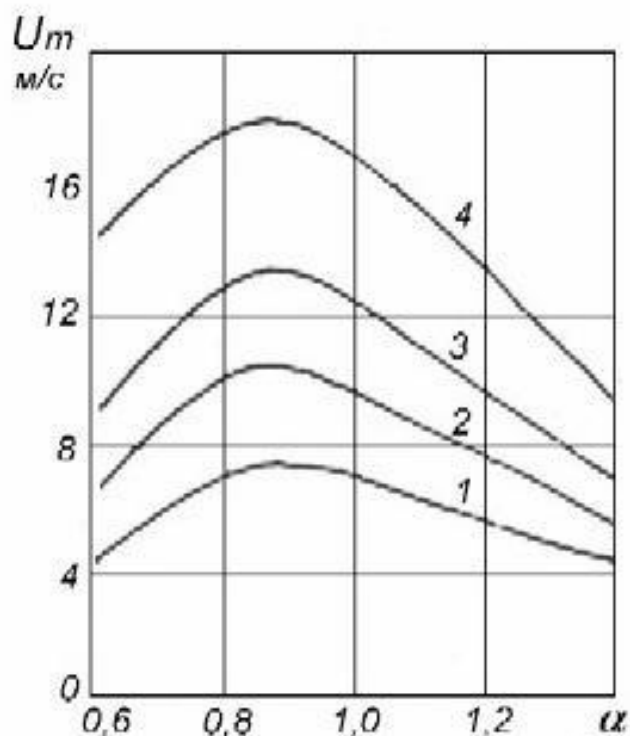


Рисунок 11- Скорость распространения турбулентного пламени в зависимости от состава ТВС при различных относительных значениях коэффициента турбулентного обмена: 1 -  $\bar{\alpha}_m = 0,27$ ; 2 -  $\bar{\alpha}_m = 0,45$ ; 3 -  $\bar{\alpha}_m = 0,65$ ; 4 -  $\bar{\alpha}_m = 1,0$ .

Зависимость  $g_e = f(\alpha)$  несколько отличается от рис.6, поскольку на величину  $g_e$  кроме индикаторного КПД влияет и коэффициент  $\eta_{мех}$ :

$$g_e = \frac{const}{\eta_i \cdot \eta_{мех}}$$

Очевидно, что при  $N_{мех} = const$  ( $n = const$ ) коэффициент

$$\eta_{мех} = 1 - \frac{N_{мех}}{N_i}$$

изменяется по  $\alpha$  так же, как и  $N_i$  (см. рис.12). В результате минимум  $g_e$  смещается относительно минимума  $g_i$  ближе к  $\alpha = 1$ . Как показывает практика, **состав ТВС на максимальную экономичность** соответствует  $\alpha \approx 1,05 \dots 1,08$  (при полностью открытой дроссельной заслонке).

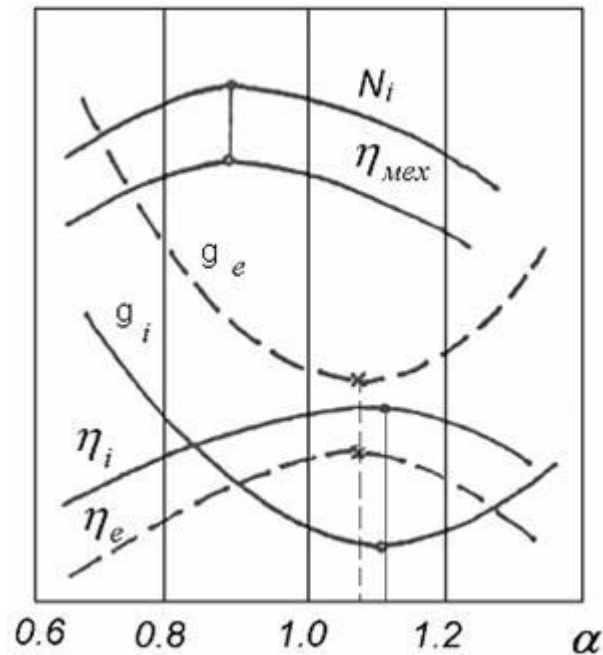


Рисунок 12 – К пояснению несовпадения минимумов  $g_e$  и  $g_i$

Если дроссельная заслонка прикрывается, то частота вращения вала двигателя снижается. Это влечёт за собой снижение скорости движения воздуха во впускном тракте, следовательно, ухудшается и качество подготовки ТВС. По этой причине доля топлива, сгорающего с максимальной полнотой, снижается и для достижения требуемой мощности двигателя приходится увеличивать общий расход топлива  $G_T$ , т.е. и  $g_e$  (см. рис.6, кривые I', II', III'). К той части топлива, которая сгорает с максимальной полнотой тепловыделения, полностью применимо всё изложенное выше относительно причин появления минимума  $g_i$  и  $g_e$  при  $\alpha > 1$ . Но при работе двигателя на частичных режимах с понижением  $n$  общий расход топлива растёт столь значительно, что величина  $\alpha$ , при которой достигается  $g_e = \min$ , рассчитанная по суммарному расходу топлива, оказывается меньше единицы (рис.6, линия III').

**Таким образом, существуют совершенно объективные причины, из-за действия которых при горении любой ТВС максимальная полнота её сгорания и максимальная работоспособность получающейся смеси газов, т.е. и мощность двигателя, реализуются при разном соотношении топлива и воздуха. При проектировании двигателя и регулировании его**

топливной аппаратуры следует знать и учитывать эти особенности **характеристики по составу ТВС.**

### *Методика проведения эксперимента*

Получение регулировочной характеристики двигателя по составу смеси происходит следующим образом:

1. Запуск и прогрев двигателя в течение 3-5 минут;
2. Двигатель выводится на режим по частоте вращения вала  $n$ , при котором планируется получение регулировочной характеристики.
3. Постепенно «обогащая» ТВС (регулировкой  $G_T$ ) выводят двигатель на режим минимально устойчивых оборотов и регистрируют параметры работы двигателя.
4. Далее «забедняя» смесь с заданным шагом регистрируют параметры работы двигателя. Повторяют эксперимент с этим шагом до минимально устойчивых оборотов, контролируя при этом частоту вращения коленчатого вала (обороты  $n$  должны быть неизменными).
5. Постепенно, изменяя состав смеси, переводят двигатель на режим оптимального коэффициента избытка воздуха. Прикрывая дроссельную заслонку, выводят двигатель на режим холостого хода и выдерживают его до установления стабильного теплового режима.
6. Выключение двигателя.

### *Содержание отчёта*

1. Принципиальная схема установки.
2. Порядок проведения эксперимента.
3. Протокол измеренных и рассчитанных величин.
4. Графическое изображение характеристики.
5. Выводы (анализ полученных характеристик).

*Вопросы для самоконтроля.*

1. Что такое характеристика поршневого ДВС по составу топливовоздушной смеси?
2. Условия и методика получения данной характеристики.
3. Основные системы испытательного стенда и измеряемые параметры
4. Объяснить характер изменения основных параметров работы ДВС при изменении состава ТВС



## 5 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2 «ВНЕШНЯЯ СКОРОСТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА»

Цель работы: Закрепление знаний полученных в курсе «ТРП ДВС». Освоение методики получения ВСХ. Изучение причин изменения  $M_{кр}$ ,  $N_e$ ,  $g_e$ .

### Общие сведения о характеристике

**Скоростными характеристиками поршневого ДВС называют зависимости основных показателей его работы ( $N_e$ ,  $g_e$ ,  $M_{кр}$  и т.д.) от скорости вращения вала ( $n$ , об/мин) при постоянном положении органа регулирования режима работы и переменной нагрузке.**

Регулирование режима работы двигателя с искровым зажиганием (ДсИЗ) производят дроссельной заслонкой, расположенной во впускной системе. В двигателях с воспламенением от сжатия - зубчатой рейкой, задающей положение плунжеров топливного насоса. В данных лабораторных работах испытывается карбюраторный ДсИЗ, поэтому далее упоминается только дроссельная заслонка. Скоростные характеристики получают при регулировках топливной системы и системы зажигания, обеспечивающих максимальную мощность двигателя при данном положении дроссельной заслонки. Характеристики, полученные при открытии дроссельной заслонки менее 100%, называют **частичными**. Скоростная характеристика, полученная при полном открытии дроссельной заслонки, носит название **внешней**, поскольку её графическое изображение в координатах  $N_e = f(n)$  очерчивает внешнюю границу области возможных режимов работы двигателя. Следовательно, внешняя скоростная характеристика ДВС показывает предельные возможности двигателя в диапазоне его эксплуатации по скоростям вращения вала  $n_{min} - n_{max}$ .

Типичное изменение параметров по внешней скоростной характеристике показано на рис.13. Для пояснения этих зависимостей удобно использовать известные взаимосвязи параметров работы поршневых

двигателей. Так эффективная мощность  $N_e$  может быть представлена как произведение крутящего момента на валу двигателя на его угловую скорость:

$$N_e = M_{кр} \cdot \omega = M_{кр} \frac{2\pi \cdot n}{60} = 0,1047 \cdot M_{кр} \cdot n$$

Поскольку

$$N_e = \frac{P_e \cdot V_h \cdot n}{30\tau}$$

где  $P_e$  - среднее эффективное давление,  $V_h$ - рабочий объём цилиндров двигателя,  $\tau$ - его тактность, то

$$M_{кр} = \frac{P_e \cdot V_h}{\pi \cdot \tau}$$

Для конкретного двигателя  $V_h = \text{const}$  и  $\tau = \text{const}$ , следовательно,  $M_{кр} = \text{const} P_e$ . Поскольку

$$P_e = P_i \cdot \eta_{\text{мех}},$$

то, используя известное выражение

$$P_i = \frac{H_u}{\alpha \cdot L_0} \cdot \eta_v \cdot \rho_k \cdot \eta_i$$

можно выяснить: какие параметры и как влияют на характер зависимости  $M_{кр} = f(n)$ .

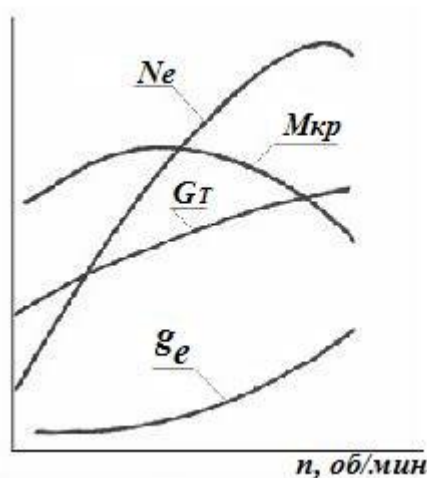


Рисунок 13 – Типичное изменение параметров двигателя по внешней скоростной характеристике

При получении внешней скоростной характеристики топливо ( $H_u/L_0$ ), внешние условия ( $\rho_k$ ), настройка двигателя на максимальную мощность ( $\alpha=0,85\dots 0,95$ ) и зависящий от  $\alpha$  индикаторный КПД  $\eta_i$  являются постоянными величинами, следовательно,

$$M_{кр} = const \cdot \eta_v \cdot \eta_{мех}$$

Изменение  $\eta_v$  по частоте вращения вала  $n$  (рис.14) объясняется тем, что с увеличением  $n$  растёт средняя скорость поршня  $w_{н.ср} = \frac{S \cdot n}{30}$  и вместе с ней скорость движения топливовоздушной смеси во впускной системе. Это приводит к количественному возрастанию двух эффектов, противоположно влияющих на  $\eta_v$  (см. рис.14):

- увеличивается гидравлическое сопротивление впускной системы  $\Delta P_a$  (по этой причине  $\eta_v$  снижается);

- увеличивается дозарядка цилиндров двигателя топливовоздушной смесью ( $\phi_{доз}$ ) за счёт инерционности потока во впускной системе и запаздывания закрытия впускных клапанов (это приводит к росту  $\eta_v$ ).

В результате при некотором значении  $n_{opt}$  коэффициент наполнения достигает своего максимального значения. Это означает, что на данном режиме в цилиндры двигателя поступает максимальное количество энергоносителя, что при прочих равных условиях обеспечит максимальное выделение тепла, совершение максимальной работы  $L_i = P_i V_h$  и максимальной удельной работы цикла  $P_i=L_i/V_h$  (см. рис.14).

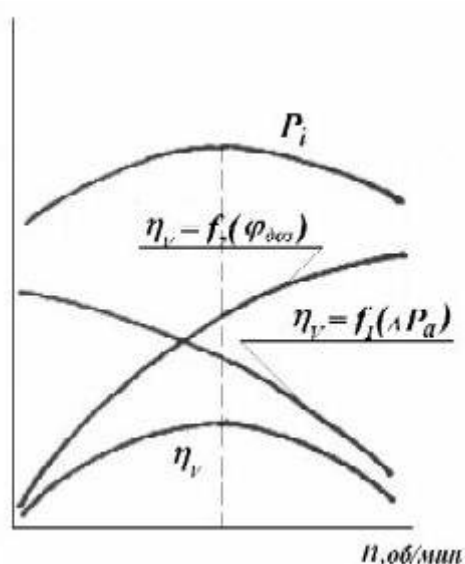


Рисунок 14 – Изменение коэффициента наполнения и среднего индикаторного давления по частоте вращения вала

Удельная работа  $P_e$ , которую можно реализовать на валу двигателя, отличается от той, что получена в цилиндре ( $P_i$ ), на величину механических потерь. Известно, что

$$\eta_{\text{мех}} = 1 - \frac{N_{\text{мех}}}{N_i}$$

где  $N_{\text{мех}}$  - затраты энергии на внутренние потребности двигателя, а  $N_i$  - индикаторная мощность, полученная в цилиндрах двигателя. Поскольку

$$N_i = \frac{H_u}{\alpha \cdot L_0} \cdot V_h \cdot \eta_v \cdot \rho_k \cdot \frac{n}{30 \cdot \tau} \cdot \eta_i$$

то по определению внешней скоростной характеристики

$$\frac{H_u}{\alpha \cdot L_0} \cdot V_h \cdot \eta_v \cdot \rho_k \cdot \eta_i \cdot \frac{1}{30 \cdot \tau} = \text{const} = K$$

т.е.

$$N_i = K \eta_v n.$$

Очевидно, что произведение  $\eta_v$  и  $n$  даёт зависимость  $N_i = B \cdot n^p$  (здесь  $p$  либо равно 1, либо менее 1), представленную на рис.15.

Мощность механических потерь обобщённо может быть выражена как

$$N_{\text{мех}} = A \cdot n^m,$$

где  $m = 1,8 \dots 2,2$  в зависимости от конструкции двигателя. В среднем можно принять  $m = 2$ . Тогда

$$\eta_{\text{мех}} = 1 - \frac{A n^2}{B n} = 1 - C n$$

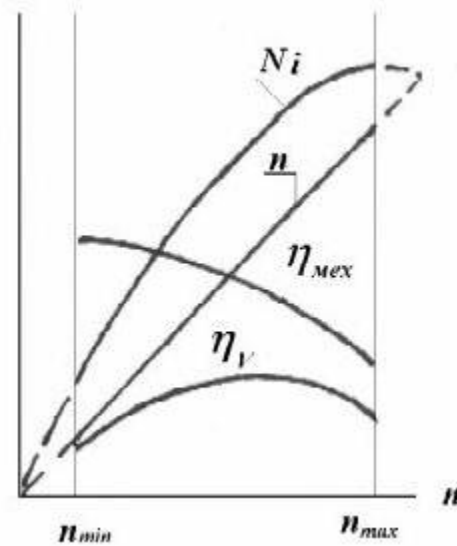


Рисунок 15 – К пояснению характера зависимости индикаторной мощности от частоты вращения вала двигателя

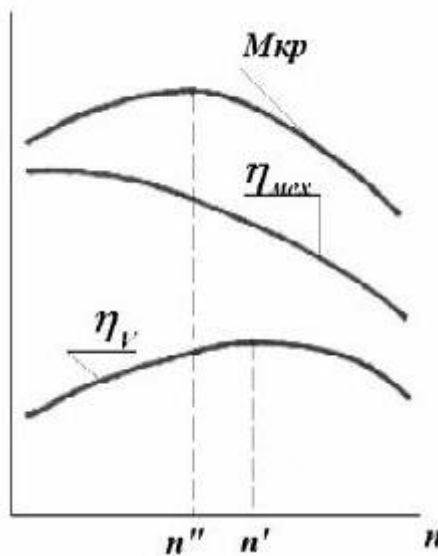


Рисунок 16 – Характер изменения крутящего момента на валу двигателя от частоты его вращения

т.е. с ростом частоты вращения вала коэффициент  $\eta_{\text{мех}}$  уменьшается (рис.16). Подводя итог изложенному анализу изменения основных параметров работы двигателя, можно сказать, что на основе выражения (4.6) получается зависимость  $M_{\text{кр}} = f(n)$ , изображённая на рис.16, а на основе выражения (4.4)

зависимость  $N_e = f(n)$ , изображённая на рис.13. Чтобы уяснить характер зависимости  $g_e = f(n)$ , следует вспомнить, что

$$g_e = \frac{3600}{H_u \cdot \eta_i \cdot \eta_{мех}}$$

При постоянной величине  $\alpha$  (настройка двигателя на максимальную мощность)  $g_e \sim 1/\eta_{мех}$ , что и даёт зависимость, приведенную на рис.13. В современных двигателях настройка карбюратора или системы впрыска топлива выполняется с учётом экологических требований, что выражается в отступлении на некоторых режимах от  $\alpha$ , обеспечивающего  $N_{e\max}$ . Поэтому характер зависимости  $g_e = f(n)$  может отличаться от изображённого на рис.13, поскольку на неё будет оказывать влияние изменение  $\eta_i$  от  $\alpha$ .

### *Методика проведения эксперимента*

Получение внешней характеристики двигателя происходит следующим образом:

1. Запуск и прогрев двигателя в течение 3-5 минут;
2. Двигатель выводится на режим по максимальной частоте вращения 10000 об/мин, соответствующий первой экспериментальной точке. Постепенно открывают дроссельную заслонку карбюратора до полностью открытого состояния.
3. Производится регистрация параметров работы двигателя.
4. Регулированием нагрузки (смена воздушного винта) режим работы двигателя по частоте вращения вала уменьшается на 1500 об/мин. Производится регистрация параметров.
5. Этот шаг повторяется до номинальной частоты вращения  $n_{ном}=4000$  об/мин. Положение дроссельной заслонки при этом сохраняется неизменным.

6. Далее, прикрывая дроссельную заслонку, выводят двигатель на 1800 об/мин, одновременно открывая дроссельную заслонку до полностью открытого состояния выставляют заданный режим.

7. Производится регистрация параметров работы двигателя.

8. Регулированием нагрузки режим работы двигателя по частоте вращения вала уменьшается на 2000 об/мин. Производится регистрация параметров.

9. Характеристику продолжают получать до минимальной частоты вращения КВ об/мин.

10. Постепенно прикрывая дроссельную заслонку, выводят двигатель на режим холостого хода и выдерживают его до установления стабильного теплового режима.

11. Выключение двигателя.

#### *Содержание отчёта*

1. Принципиальная схема установки.
2. Порядок проведения эксперимента.
3. Протокол измеренных и рассчитанных величин.
4. Графическое изображение характеристики.
5. Выводы (анализ полученных характеристик).

#### *Вопросы для самоконтроля*

1. Что такое скоростные характеристики поршневого ДВС?
2. В чём отличие частичных и внешней скоростных характеристик?
3. Условия и методика получения внешней скоростной характеристики.
4. Объяснить характер изменения основных параметров работы ДВС по внешней скоростной характеристике.

6 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3  
«ДРОССЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА»

Цель работы: освоение методики получения дроссельной характеристики авиационного поршневого ДВС.

Общие сведения о характеристике

Основной смысл получения такой характеристики - определение рабочих режимов, на которых выполняется баланс мощности, развиваемой двигателем  $N_e$ , и мощности, потребляемой воздушным или гребным винтом  $N_B$ . Воздушный винт является нагрузкой для авиационного ДВС, а гребной винт - для судового двигателя. И у того, и у другого винта потребляемая мощность от частоты вращения изменяется по кубической параболе

$$N_B = B \cdot n^3$$

где  $B$  - постоянная величина для данной конструкции винта.

Формально, каждая точка линии  $N_e=f(n)$  по винтовой характеристике представляет собой пересечение линии  $N_B = B \cdot n^3$ , характеризующей изменение мощности, потребляемой винтом, с линиями частичных скоростных характеристик ДВС (см. рис. 17 сплошные линии).

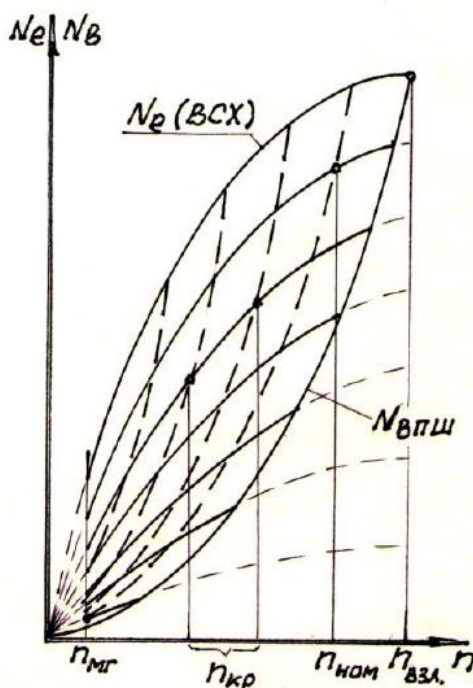




Рисунок 17 – Зависимость мощности винта и двигателя

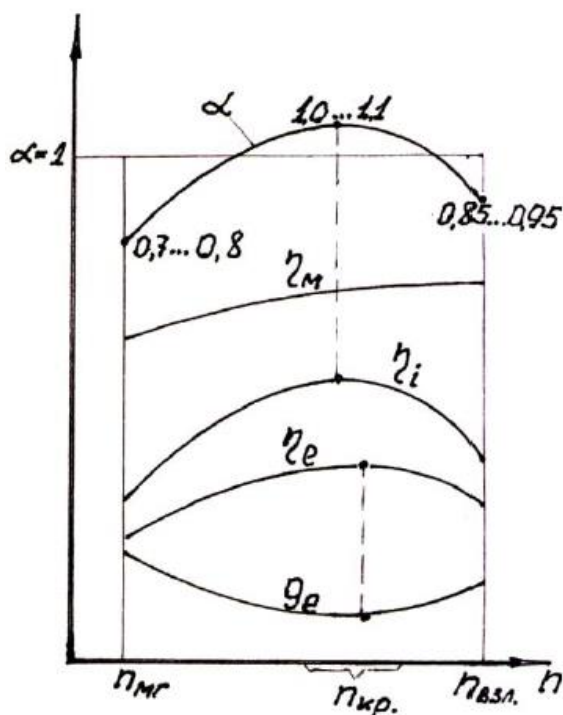


Рисунок 18 –

### *Методика проведения эксперимента*

Получение дроссельной характеристики двигателя происходит следующим образом:

1. Устанавливается необходимый воздушный винт;
2. Запуск и прогрев двигателя в течение 3-5 минут;
3. Двигатель выводится на режим частичного открытия дроссельной заслонки (80%).
4. Производится регистрация параметров работы двигателя.
5. Уменьшается частота вращения путем прикрытия дроссельной заслонки до 60% открытия. Производится регистрация параметров.
6. Далее производится дросселирование с шагом 20% открытия дросселя до частоты вращения холостого хода.
7. Производится регистрация параметров работы двигателя.

8. Постепенно прикрывая дроссельную заслонку, выводят двигатель на режим холостого хода и выдерживают его до установления стабильного теплового режима.

9. Выключение двигателя.

#### *Содержание отчёта*

1. Принципиальная схема установки.
2. Порядок проведения эксперимента.
3. Протокол измеренных и рассчитанных величин.
4. Графическое изображение характеристики.
5. Выводы (анализ полученных характеристик).

#### *Вопросы для самоконтроля*

1. Что такое дроссельная характеристика поршневого ДВС?
3. Условия и методика получения дроссельной характеристики.
4. Объяснить характер изменения основных параметров работы ДВС по дроссельной характеристике.

## 5 ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Обработка результатов измерений сводится к вычислению параметров, необходимых для графического построения характеристики двигателя. Вычисление параметров необходимо проводить в системе СИ в следующей последовательности:

- Определение атмосферного давления:

$$P_H = \frac{B_H}{735.6} \cdot 9.81 \cdot 10^4, \text{ Па}$$

где  $B_H$  - мм рт.ст. - барометрическое давление;

- Эффективная мощность двигателя  $N_e$ :

$$N_e = \frac{M_{кр} \cdot n \cdot \pi}{30000}, \text{ кВт}$$

где  $M_{кр}$ - крутящий момент в Н·м,  $n$  - частота вращения коленвала.

- Часовой расход топлива  $G_T$ :

$$G_T = \frac{3600 \cdot V_M \cdot \rho_T}{\tau}, \text{ кг/ч,}$$

где  $V_M=28,73 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$  - объем мерной емкости штихпробера;  $\rho_T$ ,  $\text{кг/м}^3$  - плотность топлива;  $\tau$ , сек, - время выработки мерного объема.

- Удельный эффективный расход топлива  $g_e$ :

$$g_e = \frac{G_T \cdot 1000}{N_e}, \text{ г / (кВт} \cdot \text{ч)}$$

- Температура воздуха на входе в карбюратор  $T_K$ :

$$T_K = t_k + 273, \text{ К}$$

где  $t_k$  - температура воздуха на входе в двигатель.