

**ВЫСШЕЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ**

**Б.Н.Киреев**

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО  
ТЕРМОДИНАМИКЕ И РАБОЧИМ  
ПРОЦЕССАМ ДВС**

**Учебное пособие**

Допущено

Научно-методическим советом по транспорту Учебно-методического объединения по профессионально-педагогическому образованию в качестве учебного пособия для студентов образовательных организаций высшего образования, обучающихся по направлению подготовки 051000.62- Профессиональное обучение (транспорт).

Елабуга

Издательство ЕИ К(П)ФУ

2015

УДК 621.1.016.7

ББК 3131

К 43

Рецензенты:

Канд. пед. наук., доц. кафедры методики профессионального обучения и технологии ЕИ К(П)ФУ Епанешников В.В.

Канд. физ. мат. наук, доц., зав. каф. общетехнических дисциплин Курского государственного университета Мелихов Ю.Ф.

### **Киреев Б.Н.**

Лабораторный практикум по термодинамике и рабочим процессам ДВС: учебное пособие для студентов высшего образования (профессиональное обучение, профиль «Транспорт»)/ Б.Н.Киреев.- Елабуга: Издательство ЕИ К(П)ФУ, 2015,- 108 с.

В пособии приведены рекомендации по выполнению шести лабораторных работ. Подготовлено в соответствии с рабочими программами специальности 051000 (44.03.04) «Профессиональное обучение по отраслям», профиль «Транспорт» (бакалавр профессионального образования).

При подготовке пособия были использованы описания стендов НТЦ-117, НТЦ-36.100 и краткие методические указания по выполнению лабораторных работ (г.Могилёв, 2012 г.), а также описание стендов 1Ч 5.8 х 4.8 и 6.8 х5.5 и методические указания по их использованию (Челябинск, 2012 г).

© Киреев Б.Н. 2015 г

© Издательство ЕИ К(П)ФУ

## **Введение.**

Термодинамика изучает методы получения, преобразования и использования теплоты и связанных с этим аппаратов и устройств. Будущие преподаватели автотранспортных дисциплин политехнических колледжей и училищ на занятиях по термодинамике знакомятся с теоретическими основами работы различных тепловых устройств, играющих исключительно важную роль в жизни человека (тепловые двигатели, теплообменные аппараты и др.), их устройством и принципом действия.

Тепловые машины, как ещё было показано С.Карно [2], работают циклически. Их идеальные циклы состоят из термодинамических процессов. Термодинамический анализ процессов, из которых состоит тот или иной цикл, позволяет найти значения коэффициента полезного действия идеальной тепловой машины.

Термодинамика является сложной технической наукой и усвоение её основных положений проходит успешнее, если изучение теории подкрепляется лабораторно-практическими занятиями. К ним относятся практические занятия по решению задач и лабораторный эксперимент по определению основных термодинамических параметров равновесного состояния рабочих тел в различных термодинамических процессах, а так же рабочих характеристик тепловых машин.

Целью данного пособия является разработка методики выполнения лабораторного практикума по учебному предмету «Термодинамика и рабочие процессы двигателей».

Первые 3 лабораторные работы посвящены изучению основных термодинамических процессов - изохорного, изобарного и адиабатного, широко используемых в идеальных циклах тепловых машин. Длительность работ- по 2 час.

Следующие три работы посвящены экспериментальному изучению рабочих характеристик тепловых машин-одноступенчатого поршневого компрессора, бензинового двигателя (ДсИЗ-двигателя с искровым зажиганием) и дизельного. Длительность работ- по 6 час.

Снятие индикаторных диаграмм проводится при стендовых испытаниях двигателей. Стендовые испытания-это отдель-

ный и важный вопрос. Условия, методы и правила испытаний двигателей изложены в ГОСТ 14846-81 «Двигатели автомобильные. Методы стендовых испытаний» и ГОСТ 18509-88 «Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний». Подробный материал по ним можно найти в источниках [9-12].

В данном лабораторном практикуме основное внимание уделяется вопросам, связанным с термодинамикой рабочих процессов, происходящих в двигателе. Вопросы, связанные со стендовыми испытаниями, детально рассматриваются при изучении курса «Автомобильные двигатели».

При выполнении лабораторных работ предполагается широкое использование студентами междисциплинарных связей. Так, например, при изучении устройства стенда НТЦ-117, необходимо использовать учебный материал из курса «Гидравлика, Гидравлические машины и гидропривод» по устройству и принципу действия тензодатчиков для измерения давления, трёхпозиционного гидрораспределителя с ручным переключателем, насосной системы (шестерённый гидронасос, бак с маслом, гидродроссель и др.), служащей нагрузкой для двигателя и т.п.

При выполнении расчётов и построении индикаторной диаграммы в двух последних работах необходимо привлекать знания из математики и информатики (например, программу MS Excel и т.п.).

Количество выполняемых студентами лабораторных работ определяется преподавателем, согласно числу часов, отводимых учебным планом на выполнение лабораторного практикума.

Прежде чем приступить к выполнению лабораторной работы на лабораторных установках, необходимо самостоятельно подготовиться к занятию: изучить основные требования техники безопасности, устройство стенда, прочитать теоретический материал, оформить разделы отчёта, не требующие наличия экспериментальных данных (например, формы таблиц), и др.

*Неподготовленные студенты к занятию не допускаются.*

Отчет по лабораторной работе оформляется каждым студентом в отдельной тетради или распечатывается на принтере.

Таблицы и расчёты желательно вначале оформить в черновом варианте, а затем, после проверки, перенести данные в распечатанный экземпляр отчёта. Возможен и электронный вариант отчёта, который студент отправляет со своего компьютера преподавателю по электронной почте.

В конце каждой работы приведены контрольные вопросы. При защите отчёта преподаватель в устной форме выборочно проверяет ответы студентов на поставленные вопросы. Или тестированием на компьютерах с помощью программы «Экзаменатор».

Описание стенда НТЦ-117, с помощью которого изучаются термодинамические процессы, приводится один раз.

## **Модуль I. Термодинамика**

### **Описание стенда НТЦ-117**

На рис. I.1 приведен общий вид стенда, а на рис I.2 - его гидравлическая схема. Стенд состоит из трёх пневмоаккумуляторов АК1, АК2 и АК3 емкостью 10 л каждый. Компрессор (рис. I.3) позволяет нагнетать воздух в пневмоаккумуляторы до избыточного давления 500 КПа. Масляный бак и насос Н2 (рис. I.4, расположены слева от стойки стенда) используются при изучении изобарного процесса. Два цилиндра: Ц1- воздушный (рис.I.5) и Ц2-масляный (рис.I.6) соединены штоком (рис. I.7), который может перемещаться под действием сил давления (масла или воздуха) в цилиндрах.

Температура воздуха в пневмоаккумуляторах измеряется с помощью термодатчиков. Для регистрации температуры Т1, Т2 и Т3 используется электронная схема с цифровым индикатором.

Избыточное давления воздуха определяется с помощью тензодатчиков Д1, Д2 и Д3, электронной схемы и цифровых индикаторов, расположенных на вертикальной панели. Датчик Д4 фиксирует давление масла в гидроцилиндре.

Гидрораспределитель Р4 трёхпозиционный с ручным переключением ( устройство и принцип действия гидрораспре-

делителя детально показано в презентации «Объёмный гидропривод» из курса «Гидравлические машины и гидропривод»).



Рис. I.1. Общий вид стенда НТЦ-117

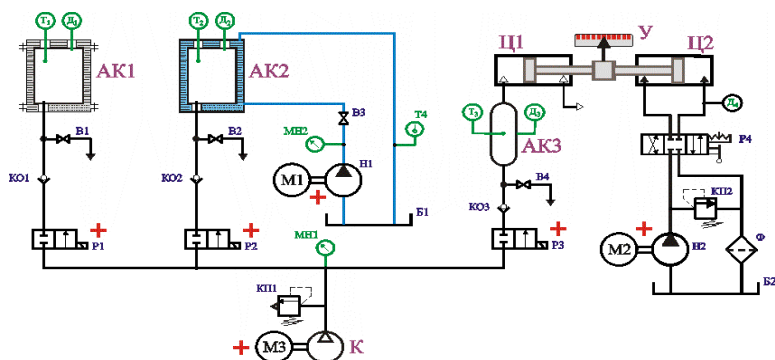


Рисунок I.2. Гидравлическая схема установки

На рис. I.8 показано нейтральное положение рукоятки, на рис. I.9-левое положение рукоятки, на рис. I.10-правое положение рукоятки. Позволяет переключать потоки масла в цилиндре Ц2. Поршень в гидроцилиндре (Ц2) при этом может перемещаться, как в одну сторону (вправо), так и в другую сторону



Рис.1.3. Компрессор, используемый для нагнетания воздуха в пневмоаккумуляторы



Рис. 1.4. Масляный насос и бак с маслом



Рис.1.5. Воздушный цилиндр Ц1



Рис. I.6. Масляный цилиндр Ц2



Рис. I.7. Шток, соединяющий цилиндры



Рис. I.8. Нейтральное положение (выключен) ручки переключателя гидрораспределителя



(влево). Соответственно шток, соединяющий цилиндры, будет перемещаться влево, увеличивая общий объём цилиндра Ц1 и пневмоаккумулятора АК3 (переключатель в правом положении).

Пневмораспределители P1, P2 и P3 электрического типа, двухпозиционные (Вкл., Выкл), позволяют направить поток воздуха из компрессора в тот или иной пневмоаккумулятор.



Рис. I.9. Правое положение ручки переключателя гидрораспределителя



Рис. I.10. Левое положение ручки переключателя гидрораспределителя

Вентили В1, В2 и В4 расположены под плоской поверхностью стола у переднего края. При их открытии полости пневмоаккумуляторов соединяются с атмосферой.

## Лабораторная работа № 1

### Изучение изохорного процесса

**Цель работы:** экспериментально изучить изохорный процесс, рассчитать изменения функций состояния, теплоту и работу процесса.

**Приборы и оборудование:** стенд НТЦ-117.

#### *Краткие теоретические сведения*

Изохорным процессом называется процесс, идущий при постоянном объёме  $V_1 = V_2 = \text{const}$ . Уравнение процесса:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad (1-1)$$

Получают его, записывая уравнение Менделеева-Клапейрона для двух равновесных состояний рабочего тела:

$$P_1 \cdot V_1 = \frac{m}{\mu} \cdot R \cdot T_1 \quad \text{и} \quad P_2 \cdot V_2 = \frac{m}{\mu} \cdot R \cdot T_2$$

При делении второго уравнения на первое и получается формула (1-1).

На диаграмме P-V изохорный процесс изображается в виде прямой, параллельной оси O-P.

Согласно определению, работа по изменению объёма рабочего тела при переходе его из одного равновесного состояния в другое равновесное состояние:

$$\delta L = P \cdot dV; \quad \int \delta L = \int_1^2 P \cdot dV; \quad L = \int_1^2 P \cdot dV. \quad (1-2)$$

При неизменном объёме ( $dV=0$ ) работа равна нулю,  $L = 0$ .

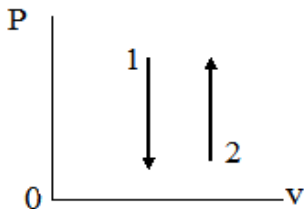


Рис. 1.1. Изображение изохорного процесса на диаграмме P-V (линия 1-изохорное охлаждение, линия 2-изохорное нагревание)

В термодинамике при расчётах равновесных состояний термодинамической системы (или рабочего тела для тепловых машин) часто используют удельные значения физических величин, рассчитанные на единицу массы. Это удобно делать,

если масса рабочего тела неизвестна. Так, вместо полного объёма используется удельный объём:

$$v_2 = \frac{V_2}{m}; \quad v_1 = \frac{V_1}{m}. \quad (1-3)$$

удельная работа  $l = \frac{L}{m}$ ; удельная теплота  $q = \frac{Q}{m}$  и так далее.

Основной закон термодинамики – *первое начало* – в математическом выражении имеет следующий вид:

$$\delta Q = dU + \delta L; \quad (1-4) \quad Q = (U_2 - U_1) + L. \quad (1-5)$$

Формула (1-4)-дифференциальная форма записи закона, а формула (1-5) – интегральная форма записи. Для удельных значений формы записи 1-го начала принимают вид:

$$\delta q = du + \delta l; \quad (1-6) \quad q = (u_2 - u_1) + l. \quad (1-7)$$

Здесь  $(u_2 - u_1)$  – изменение удельных значений внутренней энергии термодинамической системы (рабочего тела) при её переходе из одного равновесного состояния в другое.

Следует иметь в виду, что в уравнение в дифференциальной форме входят два вида дифференциалов:  $du$ - полный дифференциал,  $\delta l$  –неполный дифференциал. Не вникая в детали математического анализа, отметим только, что для нахождения изменения функций, являющихся *полным дифференциалом*, надо знать их значения только в начальном и конечном равновесных состояниях, независимо от пути перехода системы из первого состояния во второе, т.е. независимо от процесса, который совершает система. Таким образом находятся изменения *внутренней энергии, энтропии, энтальпии и других функций состояния*.

Если рассчитываемая величина не является функцией состояния (её дифференциальное значение записывается в виде неполного дифференциала), например, работа в формуле (1-2), то для нахождения численного значения работы из ф-лы (1-2) необходимо знать зависимость (вид функции) давления от объёма. Для разных термодинамических процессов эта зависимость различна. Следовательно, для нахождения работы необходимо знать, какой термодинамический процесс при этом происходит.

Дифференциал теплоты согласно первому началу складывается из полного дифференциала внутренней энергии и неполного дифференциала работы, поэтому он является неполным дифференциалом и зависит от процесса (ф-ла 1-6). *Теплоту и работу называют функциями процесса*.

Для изохорного процесса удельная теплота процесса  $q = \Delta u$ , так как работа при этом не совершается.

$$\delta l = \int_1^2 P \cdot dv = 0, \text{ так как } dv = d(\text{const}) = 0.$$

*Объём не меняется, является величиной постоянной, поэтому любое его изменение, в том числе и бесконечно малое, дифференциал, так же равно 0.*

$$q = \Delta u = (u_2 - u_1) = c_v \cdot \Delta t^\circ\text{C} = c_v \cdot (t_2^0 - t_1^0). \quad (1-8)$$

Здесь  $c_v$  - удельная изохорная теплоёмкость. Вместо неё можно использовать значения молярной изохорной теплоёмкости:

$$c_v = \frac{C_v^\mu}{\mu}; \quad C_v^\mu = \frac{5}{2} \cdot R = 2,5 \cdot 8314 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{град}} = 20800 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{град}} \quad (1-9)$$

*Эта формула справедлива для идеальных двухатомных газов, к которым относится и воздух.* Для воздуха  $\mu = 29 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$  и

значение удельной изохорной теплоёмкости для идеального воздуха  $c_v = \frac{C_v^\mu}{\mu} = 717 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}.$

Изменение полной удельной энергии:

$$\Delta U = \frac{m}{\mu} \cdot C_v^\mu \cdot \Delta t^0. \quad (1-10)$$

$\Delta t^0 = (t_2^0 - t_1^0)$  – разность температур рабочего тела в конечном ( $t_2^0$ ) и начальном ( $t_1^0$ ) равновесных состояниях.

Примечание: так как  $1^\circ\text{C} = 1^\circ\text{K}$ , то разность температур можно брать как в градусах Цельсия,  $\Delta t^\circ\text{C} = \Delta T^\circ\text{K} = T_2^0 - T_1^0 = (t_2^0 - t_1^0)$ , так и в градусах Кельвина.

Для нахождения изменения удельных значений (для единицы массы газа) энтропии можно использовать формулы:

$$\Delta s = c_v \cdot \ln \frac{P_2}{P_1} + c_p \cdot \ln \frac{v_2}{v_1}; \quad (1-11)$$

$$\Delta s = c_v \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} + R_\mu \cdot \ln \frac{v_2}{v_1}. \quad (1-12)$$

Для изохорного процесса следует:

$$\Delta s = c_v \cdot \ln \frac{P_2}{P_1} = c_v \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}. \quad (1-13)$$

### Выполнение работы

**Задание 1. Изучить устройство стенда НТЦ-117**

**Задание 2. Провести измерения**

А) Перед началом работы открыть вентиль В4 и «сравить» давление в емкости АК3 до атмосферного давления, затем закрыть вентиль В4, проверить положение тумблера SA11 «Разрешение счета» - выключен (рычажок вниз).

Б) Включить стенд автоматическим выключателем «СЕТЬ». Через несколько секунд на индикаторах Д1 – Д4 отобразятся показания, а на служебном индикаторе «Секундомер» высветится символ «L1». Зафиксировать начальные показания датчика давления Д3 (давление в пневмоаккумуляторе АК3) и температуру с прибора «Измеритель температуры» (согласно его руководства установить вывод на индикацию с 3-го канала измерения).

В) Убедиться, что шток пневмоцилиндра Ц1 неподвижен и находится в полностью выдвинутом положении. Если же это условие не выполнено, то включить насос Н2 гидросистемы цилиндра Ц2 тумблером SA6 «Н2» - рычажок в положение «Вкл.». С помощью гидрораспределителя Р4 с ручным приводом переместить шток гидроцилиндра в направлении от пневмоцилиндра до выхода указателя на крайние метки на линейке (рукоятку Р4 установить в правое положение, рис.1.10). Отключить насос Н2, рычажок тумблера SA6 «Н2» - в положение «Выкл.».

Г) Включить компрессор тумблером SA7 «К» - рычажок в положение «Вкл.» и затем установить тумблер SA4 «Р3» - рычажок в положение «Вкл.». По достижении определённого давления в емкости АК3 (задаётся преподавателем, но не более допустимого рабочего давления компрессора, 550-600 кПа) отключить тумблер SA4 «Р3» - рычажок в положение «Выкл.». Отключить компрессор тумблером SA7 «К» - рычажок в положение «Выкл.»

Д) Снять показания датчика давления Д3 и температуры воздуха в промежуток времени, когда установится максимальное значение температуры в пневмоаккумуляторе АК3. Затем через некоторое время воздух в в пневмоаккумуляторе АК3 начнет остывать и давление падать. Снять снова показания температуры и давления, когда изменения этих параметров в течение некоторого времени остаются постоянными (3-5 мин).

Е) По окончании эксперимента вентилем В4 «сравить» воздух из емкости АК3.

- Ж) Повторить эксперимент 3 раза, при различных начальных показаниях температуры и давления. Данные занести в табл.1.1.  
 З) Отключить стенд автоматическим выключателем «СЕТЬ».

### Задание 3. Провести расчёты

По результатам измерений произвести расчеты, используя формулы (1-1)- (1-13). Данные занести в табл.1.1.

Таблица 1.1. Результаты эксперимента и расчётов

N n/n	Наименование физической величины	Номер опыта		
		1	2	3
1	Давление начальное $P_1^{изб}$ , кПа			
2	Давление конечное $P_2^{изб}$ , кПа			
3	Температура начальная $t_1^0$ , °C			
4	Температура конечная $t_2^0$ , °C			
5	Объём воздуха $V_2=V_1$ , м <sup>3</sup>			
6	Масса $m$ , кг			
7	Удельная работа $l$ , $\frac{Дж}{кг}$			
8	Полная работа $L$ , Дж			
9	Изменение удельной внутренней энергии $\Delta u$ , $\frac{Дж}{кг}$			
10	Изменение внутренней энергии $\Delta U$ , Дж			
11	Удельная теплота $q$ , $\frac{Дж}{кг}$			
12	Теплота $Q$ , Дж			
13	Удельная теплоёмкость воздуха $c_v$ , $\frac{Дж}{кг \cdot град}$	717		
14	Изменение удельной энтропии $\Delta s$ , $\frac{Дж}{кг \cdot град}$			
15	Изменение энтропии $\Delta S$ , $\frac{Дж}{град}$			

Примечание. Правила округления при проведении приближённых вычислений даны в Приложении 2.

1. Для нахождения объёма воздуха в системе пневмоаккумулятор + пневмоцилиндр необходимо рассчитать объём пневмоцилиндра, считая его диаметр равным  $D = 55$  мм и длину (ход поршня)  $h = 200$  мм. Объём пневмоаккумулятора равен 10 л.

*Примечание.* Если шток правого (воздушного) цилиндра находится в крайнем правом положении (поршень полностью вдвигнут в цилиндр), то объём воздуха равен только объёму пневмоаккумулятора АКЗ ( $10 \text{ л} = 10^{-2} \text{ м}^3$ ).

2. Массу воздуха в системе можно приближённо найти, используя уравнение Менделеева-Клапейрона для начального состояния. Подставляя значения экспериментальных данных температуры и давления в формулу (1-1), можно проверить, с какой погрешностью уравнение Менделеева-Клапейрона выполняется для реального воздуха при небольших изменениях температуры и давления, наблюдаемых в данном эксперименте.

3. Остальные параметры и функции рассчитать, используя приведенные выше формулы. Данные занести в табл.1.1. Сделать выводы.

### Пример проведения расчётов.

**Опыт 1.** В эксперименте получены значения  $P_{\text{изб1}} = 226$  кПа,  $t_1^0 = 34^0 \text{ C}$ ,  $P_{\text{изб2}} = 217$  кПа,  $t_2^0 = 27^0 \text{ C}$ .

А) Проверим выполнимость уравнения (1-1):

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

В расчётах используются абсолютные значения давлений  $P = P_{\text{атм}} + P_{\text{изб}}$ . Нормальное атмосферное давление приближённо можно принять равным  $P_{\text{атм}} = 100$  кПа.

Температуру в градусах Цельсия необходимо перевести в градусы Кельвина:  $T^0\text{K} = t^0\text{C} + 273,15 = (t^0 + 273) ^0\text{K}$ .

Следовательно:  $\frac{(217 + 100)\text{кПа}}{(226 + 100)\text{кПа}} = \frac{(300) ^0\text{K}}{(307) ^0\text{K}}$ ;  $0,972 = 0,977$

Относительное расхождение левой и правой частей уравнения (1-1) составляет:

$$\beta = \frac{[(0,977 - 0,972)]}{0,972} \cdot 100\% = 0,51\%.$$

Примечание: при нахождении подобных расхождений принято брать положительные максимальные значения, т.е. из большей величины вычитают меньшую величину и делят на меньшую.

Б) Проведём расчёты объёма воздуха, находящегося в системе пневмоаккумулятор АКЗ+пневмоцилиндр.

Объём пневмоцилиндра:  $V_{ц} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot h$ ,  $D = 55 \text{ мм}$ ,  $h = 200 \text{ мм}$ .

$$V_{ц} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot h = \frac{3,14}{4} \cdot (55 \cdot 10^{-3} \text{ м})^2 \cdot 0,2 \text{ м} = 4,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3.$$

Полный объём воздуха в системе (если шток пневмоцилиндра выдвинут полностью):

$$V = 10 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 + 4,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 = 10^{-3} \text{ м}^3 (10 + 0,47) = 10,47 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

В) Масса воздуха в системе:  $m = \frac{P \cdot V \cdot \mu}{R \cdot T}$ .

$$R_{\mu} = \frac{R}{\mu} = \frac{8314}{29} \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} = 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}.$$

$$m = \frac{P_1 \cdot V_1 \cdot \mu}{R \cdot T_1} = \frac{326 \cdot 10^3 \text{ Па} \cdot 10,47 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3}{287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot 307 \text{ К}} = 0,0387 \text{ кг}; \quad \text{Дж} = \text{Па} \cdot \text{м}^3$$

Г) Полная работа по изменению объёма в изохорном процессе:

$$L = \int_1^2 P \cdot dV = l \cdot m = 0. \quad \text{Удельная работа } l = \frac{L}{m} = \int_1^2 P \cdot dv = 0.$$

Д) Изменение удельной внутренней энергии:

$$\Delta u = (u_2 - u_1) = c_v \cdot (t_2^0 - t_1^0) = \frac{5 \cdot R}{2 \cdot \mu} \cdot (t_2^0 - t_1^0) = 2,5 \cdot 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot (-7^{\circ}\text{C});$$

$$\Delta u = -5020 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

Изменение полной внутренней энергии при изохорном охлаждении воздуха:

$$\Delta U = (U_2 - U_1) = m \cdot \Delta u = 0,0387 \text{ кг} \cdot (-5020 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}) = -194 \text{ Дж}.$$

Е) Выделяемая в результате охлаждения воздуха удельная теплота:

$$q = \Delta u = -5020 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

Полная выделяемая теплота  $Q = \Delta U = -194 \text{ Дж}$

Ж) Изменение удельной энтропии в результате охлаждения воздуха:

$$\Delta s = c_v \cdot \ln \frac{P_2}{P_1} = c_v \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = 717 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot \ln \frac{317 \text{ кПа}}{326 \text{ кПа}};$$

$$\Delta s = 717 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot (-0,028) = -20,1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}.$$



Полное изменение энтропии:

$$\Delta S = m \cdot \Delta s = 0,0387 \text{ кг} \cdot (-20,1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}) = -0,778 \frac{\text{Дж}}{\text{град}}.$$

## Выводы

### Контрольные вопросы

1. Какой процесс называется изохорным?
2. Как меняется температура при изменениях давления в изохорном процессе?
3. Чему равна работа в изохорном процессе?
4. Что происходит с энтропией при убывании давления в изохорном процессе? Как это можно объяснить, используя понятие физического смысла энтропии?

## Лабораторная работа № 2

### Изучение изобарного процесса

**Цель работы:** экспериментально изучить изобарный процесс, рассчитать изменения функций состояния, теплоту и работу процесса.

**Приборы и оборудование:** стенд НТЦ-117.

#### Краткие теоретические сведения

Для изобарного процесса  $P_2 = P_1 = \text{const}$ . Уравнение процесса:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}. \quad (2-1)$$

На диаграмме  $P$ - $V$  процесс изображается прямыми, параллельными оси  $0$ - $V$ .

Удельная теплота изобарного процесса (на 1 кг идеального двухатомного воздуха):

$$q = \Delta u + l = c_p \cdot (t_2^0 - t_1^0) = \frac{C_p^\mu}{\mu} \cdot (t_2^0 - t_1^0) = \frac{7}{2} \cdot R_\mu \cdot (t_2^0 - t_1^0). \quad (2-2)$$

Здесь  $c_p = \frac{7}{2} \cdot R_\mu = \frac{7}{2} \cdot \frac{R}{\mu}$  - удельная изобарная теплоёмкость двухатомного идеального воздуха. Формула (2-2) позволяет найти теплоту изобарного процесса.

Изобарный процесс будет иметь место при понижении температуры (масса воздуха неизменна). Шток пневмоцилиндра Ц1 при понижении температуры будет втягиваться. Выполняемая при этом работа:

$$\delta L = P \cdot dV; \quad \int \delta L = \int_1^2 P \cdot dV;$$

$$L = \int_1^2 p \cdot dV = P \cdot (V_2 - V_1). \quad (2-3)$$

Из формулы (2-3) следует, что при уменьшении объёма ( $V_2 < V_1$ ) работа будет иметь отрицательное значение.

Примечание: в данной работе с целью увеличения общего объёма системы к пневмоцилиндру подключается пневмоаккумулятор. Это позволяет увеличить *массу* воздуха, принимающего участие в эксперименте.

Первый объём складывается из объёма пневмоаккумулятора и объёма цилиндра Ц1 ( $V_{ц}$ ). Объём  $V_1 = V_{ак} + V_{ц}$ . При понижении температуры давление падает и для восстановления прежнего давления поршень цилиндра необходимо сместить вправо (см. схему установки, рис.1.7) на расстояние  $x = x_2 - x_1$ . Здесь  $x_1$ -расстояние от начала шкалы до первоначального положения стрелки указателя,  $x_2$ -конечное положение стрелки указателя.



Рис. 2.1.Изображение изобарного процесса на диаграмме P-V.

Следовательно второй объём станет меньше первого на величину  $x \cdot F$  :

$$V_1 - V_2 = x \cdot F \quad (2-4) \quad \text{Здесь } F = \frac{\pi D^2}{4} = 2,37 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 - \text{площадь поршня.}$$

Примечание. Объём воздуха в системе (пневмоаккумулятор АКЗ + пневмоцилиндр Ц1) при полном выходе штока из цилиндра Ц1 (крайнее левое положение, см.рис.1.8) найден в работе № 1 и составляет:

$$V = 10 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 + 4,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 = 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot (10 + 0,47) = 10,47 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

В случае, если шток не выведен влево полностью, объём воздуха в цилиндре Ц1 можно найти по формуле  $V_{ц} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot h$ , где ход поршня  $h = h_{\text{макс}} - x_1 = 200 \text{ мм} - x_1$ . В этом случае

$$V_1 = V_{\text{ак}} + V_{ц} = V_{\text{ак}} + \frac{\pi D^2}{4} \cdot h; \quad V_2 = V_1 - x \cdot F = V_1 - (x_2 - x_1) \cdot F.$$

$$\text{Работа по изменению объёма: } L = P \cdot (V_2 - V_1) = P \cdot x \cdot F. \quad (2-5)$$

Здесь  $P \cdot F = G$  – усилие на штоке цилиндра; в течение процесса оно постоянно.

$$\text{Удельная работа: } l = \frac{L}{m} \quad (2-6)$$

Изменение удельной внутренней энергии в изобарном процессе:  $\Delta u = c_v (t_2^0 - t_1^0) = \frac{5}{2} \cdot R_{\mu} \cdot (T_2^0 - T_1^0)$ . (2-7)

$$\text{Теплота процесса: } Q = \Delta U + L = q \cdot m. \quad (2-8)$$

$$\text{Удельная теплота процесса: } q = \Delta u + l. \quad (2-9)$$

Изменение удельной энтропии в изобарном процессе:

$$\Delta s = c_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}. \quad (2-10)$$

$$\text{Изменение энтропии } \Delta S = m \cdot \Delta s. \quad (2-11)$$

### **Выполнение работы**

#### **Задание 1. Изучить устройство стенда НТЦ-117**

#### **Задание 2. Провести измерения**

А) Перед началом работы открыть вентиль В4 и «сравить» давление в емкости АК3 до атмосферного давления, затем закрыть вентиль В4, проверить положение тумблера SA11 «Разрешение счета» - выключен (рычажок вниз).

Б) Включить стенд автоматическим выключателем «СЕТЬ». Через несколько секунд на индикаторах Д1 – Д4 отобразятся показания, а на служебном индикаторе «Секундомер» высветится символ «L1». Зафиксировать начальные показания датчика давления Д3 (давление в пневмоаккумуляторе АК3) и температуру с прибора «Измеритель температуры» (согласно его руководства установить вывод на индикацию с 3-го канала измерения).

В) (Пункт опустить, если указатель на штоке гидроцилиндра находится в крайнем левом положении).

Включить насос Н2 гидросистемы цилиндра Ц2 тумблером SA6 «Н2» - рычажок в положение «Вкл.». С помощью гидрораспределителя Р4 с ручным приводом переместить шток гидроцилиндра

в направлении от пневмоцилиндра до выхода указателя на крайние метки на линейке. Зафиксировать положение указателя на штоке гидроцилиндра по линейке ( $x_1$ ).

Г) Включить компрессор тумблером SA7 «К» - рычажок в положение «Вкл.» и затем установить тумблер SA4 «P3» - рычажок в положение «Вкл.». По достижении определённого давления в емкости АКЗ (значения давления задаются преподавателем, но не более 500 кПа) отключить тумблер SA4 «P3» - рычажок в положение «Выкл.».

Д) Отключить компрессор тумблером SA7 «К» - рычажок в положение «Выкл.». Снять показания датчика давления ДЗ и температуры воздуха в пневмоаккумуляторе АКЗ.

Е) Сделать паузу до тех пор, пока давление несколько упадет. С помощью гидрораспределителя Р4 с ручным приводом слегка переместить шток гидроцилиндра в направлении пневмоцилиндра до возврата давления к прежнему значению. Снять показания давления ДЗ, температуры воздуха в емкости АКЗ и измерить по шкале перемещение штока гидроцилиндра  $x_2$ . Отключить насос Н2- рычажок тумблера SA6 «Н2» - в положение «Выкл.». Данные занести в табл. 2.1.

Ж) По окончании эксперимента вентилем В4 «сравить» воздух из емкости АКЗ.

З) Провести измерения 3 раза (пункты В-Ж). Данные занести в таблицу 2.1.

И) Отключить стенд автоматическим выключателем «СЕТЬ».

По результатам измерений произвести расчеты работы изобарного процесса, а также теплоты, изменений внутренней энергии и энтропии. Данные занести в таблицу 2.1.

Таблица 2.1. Результаты эксперимента и расчётов

N n/n	Наименование физической величины	Номер опыта		
		1	2	3
1	Давление $P_1^{изб} = P_2^{изб}$ (кПа)			
2	Давление промежуточное $P_1^{*изб}$ , кПа			
3	Температура начальная $t_1^0$ , °С			
4	Температура конечная $t_2^0$ , °С			

5	$x_1$ , мм			
6	$x_2$ , мм			
7	$x = x_1 - x_2$ , мм			
8	Изменение объёма воздуха при изобарном сжатии $(V_2 - V_1) = x \cdot F$ , м <sup>3</sup>			
9	Объём $V_1 = V_{ак} + V_{ц}$ , м <sup>3</sup>			
10	Объём $V_2 = V_1 - x \cdot F$ , м <sup>3</sup>			
11	Масса $m$ , кг			
12	Удельная работа $l$ , $\frac{Дж}{кг}$			
13	Полная работа $L$ , Дж			
14	Изменение удельной внутренней энергии $\Delta u$ , $\frac{Дж}{кг}$			
15	Изменение внутренней энергии $\Delta U$ , Дж.			
16	Удельная теплота $q$ , $\frac{Дж}{кг}$			
17	Теплота $Q$ , Дж.			
18	Удельная изобарная теплоёмкость $c_p$ , $\frac{Дж}{кг \cdot град}$	1003		
19	Изменение энтропии $\Delta S$ , $\frac{Дж}{град}$			
20	Изменение удельной энтропии $\Delta s$ , $\frac{Дж}{кг \cdot град}$			

### Задание 3. Провести расчёты

По результатам измерений произвести расчеты, используя формулы (2-1)-(2-11). Данные занести в табл.2.1. Сделать выводы.

1. Рассчитать объёмы воздуха  $V_1$  и  $V_2$  в системе пневмоаккумулятор АКЗ + пневмоцилиндр. Объём пневмоаккумулятора равен 10 л. Объём пневмоцилиндра:

$$V_{ц} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot h = F \cdot h; \quad h = h_{\max} - x_1 = 200 \text{ мм} - x_1.$$

$$V_1 = V_{\text{ак}} + V_{\text{ц}} = V_{\text{ак}} + \frac{\pi D^2}{4} \cdot h; \quad V_2 = V_1 - x \cdot F = V_1 - (x_2 - x_1) \cdot F.$$

Данные занести в таблицу 2.1.

2. Массу воздуха в системе можно приближённо найти, используя уравнение Менделеева-Клапейрона для начального состояния. Уравнение Менделеева-Клапейрона выведено для идеального газа. Подставляя значения экспериментальных данных температуры и объёма в формулу  $\frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1}$  можно проверить,

с какой погрешностью оно выполняется для реального воздуха при небольших изменениях температуры и объёма, наблюдаемых в данном эксперименте.

3. Остальные параметры и функции рассчитать, используя приведенные выше формулы (2-5)-(2-11).

### Пример проведения расчётов

**Опыт 1.** В эксперименте получены значения  $P_1^{\text{изб}} = 63$  кПа,  $t_1^0 = 31^0 \text{C}$ ,  $P_1^* \text{изб} = 59$  кПа,  $t_2^0 = 28^0 \text{C}$ ,  $x_1 = 50$  мм. При сжатии воздуха в системе «пневмоаккумулятор АКЗ+пневоцилиндр» от промежуточного  $P_1^* \text{изб}$  до начального давления  $P_2^{\text{изб}} = 63$  кПа шток переместился на расстояние  $x = 32$  мм ( $x_2 = 82$  мм). Температура при этом оставалась постоянной. Можно считать, что при этом осуществлялся изобарный процесс.

А) Рассчитаем значения объёмов воздуха в системе «пневмоаккумулятор АКЗ + пневоцилиндр», полученные в результате проведения изобарного процесса:

$$V_1 = V_{\text{ак}} + V_{\text{ц}} = V_{\text{ак}} + \frac{\pi D^2}{4} \cdot h.$$

$$h = h_{\text{макс}} - x_1 = 200 \text{ мм} - x_1, \quad x_1 = 50 \text{ мм}, \quad h = 150 \text{ мм}.$$

$$V_1 = 10 \text{ л} + \frac{3,14}{4} \cdot (55 \cdot 10^{-3} \text{ м})^2 \cdot 0,15 \text{ м} = 10 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 + 0,36 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3;$$

$$V_1 = (10 + 0,36) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 = 10,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3; \quad V_2 = V_1 - x \cdot F = V_1 - (x_2 - x_1) \cdot F;$$

$$V_2 = 10,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 - (3,2 \cdot 10^{-2} \text{ м}) \cdot 2,37 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2;$$

$$V_2 = 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot (10,4 - 0,076) = 10,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

Б) Проверим выполнимость уравнения изобарного процесса

$\frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1}$ , для реального воздуха при небольших изменениях температур и объёмов:

$$\frac{10,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3}{10,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3} = \frac{301 \text{ } ^\circ\text{К}}{304 \text{ } ^\circ\text{К}}; \quad 0,990 = 0,990.$$

Относительное расхождение значений левой и правой частей формулы (2-1):

$$\beta = \frac{0,990 - 0,990}{0,990} \cdot 100\% = 0,0\%.$$

При однократном измерении совпадение значений правой и левой частей ( в пределах погрешности расчётов) может быть случайным.

В) Значения массы воздуха в системе пневмоаккумулятор АКЗ +пневмоцилиндр Ц1:

$$m = \frac{P_1 \cdot V_1 \cdot \mu}{R \cdot T_1} = \frac{P \cdot V_1}{R \mu \cdot T_1} = \frac{163 \cdot 10^3 \text{ Па} \cdot 10,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3}{287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot 304 \text{ } ^\circ\text{К}};$$

$$\text{Па} \cdot \text{м}^3 = \text{Дж}. \quad m = 0,0194 \text{ кг}.$$

Г) Полная работа по изменению объёма:

$$L = P \cdot (V_2 - V_1) = P \cdot x \cdot F$$

$$L = 163 \text{ кПа} \cdot (10,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 - 10,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3) = -16,3 \text{ Дж}.$$

$$\text{Удельная работа} : l = \frac{L}{m} = \frac{-16,3 \text{ Дж}}{0,0194 \text{ кг}} = -840 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

Д) Изменение удельной внутренней энергии:

$$\Delta u = (u_2 - u_1) = c_v \cdot (t_2^0 - t_1^0) = \frac{5 \cdot R}{2 \cdot \mu} \cdot (t_2^0 - t_1^0) = 2,5 \cdot 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot (-3^0\text{C});$$

$$\Delta u = -2150 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

Изменение внутренней энергии:

$$\Delta U = (U_2 - U_1) = m \cdot \Delta u = 0,0194 \text{ кг} \cdot (-2150 \text{ Дж/кг}) = -41,7 \text{ Дж}$$

Е) Удельная отводимая теплота:

$$q = \frac{Q}{m} = \frac{-41,7 + (-16,3) \text{ Дж}}{0,0194 \text{ кг}} = \frac{-58 \text{ Дж}}{0,0194 \text{ кг}} = -2989,69 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} = -3000 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

Удельную теплоту процесса можно определить и из формулы:

$$q = \Delta u + l = c_p \cdot (t_2^0 - t_1^0) = \frac{c_p^\mu}{\mu} \cdot (t_2^0 - t_1^0) = \frac{7}{2} \cdot R_\mu \cdot (t_2^0 - t_1^0);$$

$$q = \frac{7}{2} \cdot R_\mu \cdot (t_2^0 - t_1^0) = 3,5 \cdot 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot (-3^0\text{C}) = -3000 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

Теплота, отводимая от системы:

$$Q = \Delta U + L = -41,7 \text{ Дж} + (-16,3 \text{ Дж}) = -58 \text{ Дж}.$$

Ж) Изменение удельной энтропии:

$$\Delta s = c_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = \frac{7}{2} \cdot R_\mu \cdot \ln \frac{T_2}{T_1};$$

$$\Delta s = 3,5 \cdot 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot \ln \frac{301 \text{ } ^\circ\text{К}}{304 \text{ } ^\circ\text{К}} = -10 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}.$$

Изменение энтропии:

$$\Delta S = m \cdot \Delta s = 0,0194 \text{ кг} \cdot (-10 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}) = -0,194 \frac{\text{Дж}}{\text{град}}$$

## Выводы

### Контрольные вопросы

1. Какой процесс называется изобарным?
2. Каким образом можно определить работу в изобарном процессе?
3. Каким образом экспериментально можно определить изменение объёма при постоянном давлении?
4. В данном эксперименте энтропия возрастает или убывает? Как это можно объяснить?

## Лабораторная работа № 3

### Изучение адиабатного процесса

**Цель работы:** экспериментально изучить адиабатный процесс, рассчитать изменения функций состояния, теплоту и работу процесса.

**Приборы и оборудование:** стенд НТЦ-117.

#### *Краткие теоретические сведения*

*Адиабатным* называют термодинамический процесс изменения состояния рабочего тела, протекающий без теплообмена с окружающей средой:  $\delta Q=0$  (3-1)

На диаграмме P-V адиабата, как и изотерма, представляет гиперболу, но идущую более круто. Уравнение адиабатного процесса имеет вид:  $P \cdot V^\gamma = \text{const}$ . (3-2)

Соотношения между основными параметрами рабочего тела в адиабатном процессе:

$$\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1} = \frac{T_2}{T_1}; \quad (3-3); \quad \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^\gamma = \frac{P_2}{P_1}; \quad (3-4) \quad \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{(1-\gamma)/\gamma} = \frac{T_2}{T_1}, \quad (3-5)$$

где  $\gamma$  – показатель адиабаты, численно равный отношению теплоемкостей в изобарном и изохорном процессах  $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ . (3-6)



Примечание. В формулах (3-3)-(3-5) отношения объёмов, давлений и температур *возводятся* в степени  $\gamma$ ,  $\gamma-1$  и  $(1-\gamma)/\gamma = \frac{1-\gamma}{\gamma}$ .

Уравнения (3-3), (3-4) и (3-5) называют уравнениями Пуассона. В случае адиабатного процесса работа расширения совершается за счет изменения внутренней энергии рабочего тела:

$$\delta Q = dU + \delta L = 0, \quad (3-7) \quad \delta L = -dU. \quad (3-8)$$

Считая воздух идеальным газом, массу сжатого воздуха в пневмоаккумуляторе АК1 можно найти, используя уравнение Менделеева-Клапейрона:

$$m = \frac{P_1 \cdot V_1}{R_{\mu} \cdot T_1}. \quad (3-9)$$

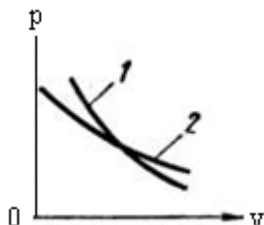


Рис. 3.1 Взаимное расположение адиабаты 1 и изотермы 2

Удельный объём сжатого воздуха  $v_1 = \frac{V_1}{m}$ , (3-10)

где  $V_1=10$  л =  $0,01$  м<sup>3</sup>- объём пневмоаккумулятора АК1. Удельный объём воздуха в конце процесса адиабатного расширения  $v_2$  можно рассчитать, используя уравнение Пуассона

в форме (3-4):  $(\frac{v_1}{v_2})^\gamma = \frac{P_2}{P_1}$ ;  $(\frac{v_1}{v_2})^\gamma = \frac{P_2}{P_1}$ ;  $P_1 \cdot v_1^\gamma = P_2 \cdot v_2^\gamma$ . (3-11)

Как и в предыдущих случаях, в формулах (3-4),(3-5),(3-9), (3-11) используются абсолютные значения давлений. Абсолютное давление  $P_1 = P_1^{изб} + P_{атм}$ . Нормальное атмосферное давление можно принять равным  $P_{атм} = 100$  кПа.

Удельную работу при адиабатном расширении находят из формул:  $l = \frac{P_1 \cdot v_1}{\gamma - 1} \cdot [1 - (\frac{P_1}{P_2})^{(1-\gamma)/\gamma}] = \frac{P_1 \cdot v_1}{\gamma - 1} \cdot [1 - (\frac{P_2}{P_1})^{(\gamma-1)/\gamma}]$ ;

$$l = \frac{(P_1 \cdot v_1 - P_2 \cdot v_2)}{\gamma - 1}, \quad (3-12)$$

для воздуха  $\gamma = 1,4$ . При адиабатном сжатии и адиабатном рас-

ширении знаки работы будут меняться на противоположные. При  $P_1 > P_2$  (расширение газов) работа положительная, а при сжатии ( $P_1 < P_2$ ) работа отрицательная. Теплота процесса  $q = 0$ . Используя первое начало термодинамики  $q = \Delta u + l$ , находим изменение удельной внутренней энергии  $\Delta u = -l$ . (3-13)  
 Удельная массовая теплоемкость для адиабатного процесса:  
 $c_{ад} = \delta q / dT = 0$ . (3-14)

Изменение удельной энтропии  $dS = \frac{\delta Q}{T} = 0$ , или  $ds = \frac{\delta q}{T} = 0$  ;  
 $\Delta s = 0$ ,  $s = \text{const}$  . (3-15)

### Выполнение работы

#### Задание 1. Изучить устройство стенда НТЦ-117

#### Задание 2. Провести измерения

Процесс происходит при резком сбросе давления воздуха из полости пневмоаккумулятора АК1, стенки которого термоизолированы. Объем пневмоаккумулятора АК1 принять равным  $V_{ак} = 0,01 \text{ м}^3$  (10 л).

А) Перед началом работы открыть вентиль В1 и «сравить» давление в емкости АК1 до атмосферного давления, затем закрыть вентиль В1, проверить положение тумблера SA11 «Разрешение счета» - выключен (рычажок вниз).

Б) Включить стенд автоматическим выключателем «СЕТЬ». Через несколько секунд на индикаторах Д1 – Д4 отобразятся показания, а на служебном индикаторе «Секундомер» высветится символ «L1». Показания датчика «Измеритель температуры» согласно его руководства установить на индикацию с 1-го канала измерения.

В) Включить компрессор тумблером SA7 «К» - рычажок в положение «Вкл.» и затем установить тумблер SA2 «P1» - рычажок в положение «Вкл.» - теплый сжатый воздух из компрессора начнет поступать в емкость АК1. Слегка приоткрыть вентиль В1, для того чтобы прогрелась поступающим теплым воздухом металлическая емкость АК1. Выждать 15-20 мин. Затем закрыть вентиль В1.

Г) По достижении определённого давления в емкости АК1 (данные задаются преподавателем, но не более 500 кПа) тумблер SA2

«P1» - рычажок в положение «Выкл.» и отключить компрессор тумблером SA7 «К» - рычажок в положение «Выкл.».

Д) Зафиксировать показания датчика давления Д1 и температуры воздуха в пневмоаккумуляторе АК1. Полностью открыть вентиль В1. При показаниях датчика давления Д1 в пневмоаккумуляторе АК1, равным 0 кПа, зафиксировать минимальную температуру в конце процесса. Данные занести в таблицу 3.1.  
 Е) Закрыть вентиль.

Ж) Провести измерения 3 раза при разных значениях P<sub>1</sub> (пункты В-Д). Данные занести в таблицу 3.1.

З) Отключить стенд автоматическим выключателем «СЕТЬ».

Таблица 3.1. Результаты эксперимента и расчётов

N n/n	Наименование физической величины	Номер опыта		
		1	2	3
1	Давление атмосферное P <sub>0</sub> , кПа	100		
2	Давление начальное P <sub>1<sup>изб</sup></sub> , кПа			
3	Температура начальная (сжатого воздуха) t <sub>1</sub> , °C			
4	Температура конечная t <sub>2</sub> , °C			
5	Давление конечное P <sub>2<sup>изб</sup></sub> , кПа	0		
6	Масса воздуха в начале расширения m, кг			
7	Объём сжатого воздуха V <sub>1</sub> , м <sup>3</sup>	0,01		
8	Удельный объём сжатого воздуха v <sub>1</sub> , $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$			

9	Удельный объём воздуха в конце процесса расширения $v_2, \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$			
10	Удельная работа расширения $l, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$			
11	Полная работа расширения $L, \text{кДж}$			
12	Изменение удельной внутренней энергии $\Delta u, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$			
13	Изменение внутренней энергии $\Delta U, \text{кДж}$			
14	Удельная теплота $q, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	0		
15	Теплота $Q, \text{кДж}$	0		
16	Удельная теплоёмкость $c_{\text{уд}}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$	0		
17	Изменение удельной энтропии $\Delta s, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$	0		
18	Изменение энтропии $\Delta S, \frac{\text{кДж}}{\text{град}}$	0		

### Задание 3. Провести расчёты

По результатам измерений произвести расчеты, используя формулы (3-9)-(3-15). Данные занести в табл.3.1. Сделать выводы.

### Пример проведения расчётов

**Опыт 1.** В эксперименте получены значения:

$$P_1^{\text{изб}} = 143 \text{ кПа}, \quad t_1^0 = 33^0\text{С}, \quad P_2^{\text{изб}} = 0 \text{ кПа}, \quad t_2^0 = 20^0\text{С}.$$

А) Определим массу сжатого воздуха в пневмоаккумуляторе АК1:

$$m = \frac{P_1 \cdot V_1}{R_{\mu} \cdot T_1}; \quad m = \frac{(143+100) \cdot 10^3 \text{ Па} \cdot 0,01 \cdot \text{м}^3}{287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot 306 \text{ } ^0\text{К}};$$

$$m = 0,028 \text{ кг.} \quad (\text{Па} \cdot \text{м}^3 = \text{Дж})$$

Б) Удельный объём сжатого воздуха:

$$v_1 = \frac{V_1}{m} = \frac{0,01 \text{ м}^3}{0,028 \text{ кг}} = 0,36 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

В) Удельный объём воздуха в конце процесса адиабатного расширения  $v_2$  можно рассчитать, используя уравнение Пуассона

$$P_1 \cdot v_1^\gamma = P_2 \cdot v_2^\gamma; \quad v_2 = \left[ \frac{P_1 \cdot (v_1)^\gamma}{P_2} \right]^{1/\gamma} = v_1 \cdot \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{1/\gamma}$$

$$v_2 = 0,36 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \cdot \left( \frac{243 \text{ кПа}}{100 \text{ кПа}} \right)^{0,714} = 0,68 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}};$$

Г) Удельная работа по изменению объёма воздуха при адиабатном расширении  $\left( \frac{\text{М}^3}{\text{кг}} \right)$ :

$$l = \frac{P_1 \cdot v_1}{\gamma - 1} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{(1-\gamma)/\gamma} \right] = \frac{(P_1 \cdot v_1 - P_2 \cdot v_2)}{\gamma - 1};$$

$$l = \frac{(243 \cdot 10^3 \text{ Па} \cdot 0,36 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} - 100 \cdot 10^3 \text{ Па} \cdot 0,68 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}})}{1,4 - 1};$$

$$l = 48,7 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} = 49 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Полная работа по изменению объёма воздуха:

$$L = m \cdot l = 0,028 \text{ кг} \cdot 49 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} = 1,37 \text{ кДж}.$$

Д) Изменение удельной внутренней энергии воздуха:

$$\Delta u = -l = -49 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Изменение внутренней энергии:

$$\Delta U = (U_2 - U_1) = m \cdot \Delta u = 0,028 \text{ кг} \cdot (-49 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}) = -1,37 \text{ кДж}.$$

Е) Удельная теплота в процессе не подводится и не отводится,  $q = 0$ . Теплота  $Q = m \cdot q = 0$ .

Ж) Адиабатная теплоёмкость  $c_{\text{ад}} = \delta q / d = 0$ .

З) Изменение удельной энтропии  $\Delta s = 0$ ,  $s = \text{const}$ .

Изменение полной энтропии:  $\Delta S = m \cdot \Delta s = 0$ .

## Выводы

### Контрольные вопросы

1. Какой процесс называется адиабатным?
2. Назвать основное оборудование установки для проведения адиабатного процесса в данном эксперименте.
3. Чему равна теплоёмкость процесса?

4. Записать формулы для расчёта удельной работы при адиабатном расширении воздуха.
5. Какой линией изображается адиабата на диаграммах  $P$ -  $V$ ,  $T$ - $S$ ? (прямая, парабола, гиперболa, эллипс?)
6. Чему равен показатель адиабаты для идеальных одноатомных, двухатомных и трёхатомных газов?

## **Модуль 2. Анализ термодинамических циклов тепловых двигателей и машин. Экспериментальное определение их рабочих характеристик**

### **Лабораторная работа № 4**

#### **Изучение работы одноступенчатого поршневого компрессора.**

**Цель работы:** познакомиться с устройством, принципом действия и теплотехническими расчётами характеристик одноступенчатого поршневого компрессора.

**Приборы и оборудование:** одноступенчатый поршневой компрессор, газовый счётчик, регулятор (измеритель) напряжения, амперметр, секундомер, измерители температуры.

#### ***Краткие теоретические сведения***

Машины, служащие для перемещения жидкостей и газов и повышения их потенциальной и кинетической энергии, называются нагнетателями. В зависимости от вида перемещаемого рабочего тела нагнетатели разделяются на две группы: а) насосы - машины, подающие жидкости; б) вентиляторы и компрессоры - машины, подающие воздух и технические газы.

На транспорте сжатый воздух необходим для нормальной работы тормозов в поезде и на локомотиве. Он также обеспечивает работу пневмоконтакторов, подачи звуковых сигналов тифоном и свистком, работы пневмопривода стеклоочистителей. Для обеспечения тепловоза сжатым воздухом используется тепловозный компрессор.

Питание цилиндров дизелей воздухом можно производить непосредственно из атмосферы или через специальный компрессор, который создает давление выше атмосферного. Сжатый воздух занимает меньший объем, чем несжатый, поэтому в одном и

том же цилиндре (объеме), помещается больше (по весу) воздуха, что позволяет больше сжечь топлива, обеспечив хорошие условия его сгорания, т. е. получить больше тепла, а следовательно, и большую мощность. В результате такой дополнительной подачи сжатого воздуха и топлива мощность дизеля увеличивается. Так, например, мощность дизеля ПД1 при использовании турбокомпрессора возрастает в 1,82 раза, с 486 до 882 кВт, хотя его габаритные размеры остаются неизменными. Есть конструкции, в которых мощность дизеля повышена более чем в 2 раза. Подачу в цилиндры дизеля предварительно сжатого воздуха, давление которого выше атмосферного, (в тепловозных дизелях на 39-196 кПа) называют *наддувом*. Любой двигатель дизельный, бензиновый или работающий на газе, имеющий жидкостное или воздушное охлаждение, может быть оснащен турбокомпрессором. Турбокомпрессоры используются на двигателях как с большим рабочим объемом (судовых, тепловозных и стационарных), так и на двигателях грузовых и легковых автомобилей. В настоящее время практически все большие дизельные двигатели мощностью более 150 кВт, используемые в промышленности, судостроении и на дорожно-строительных работах, оснащаются турбокомпрессором.

В сфере автомобильного транспорта любой дизельный двигатель мощностью более 80 кВт стандартно оснащается турбокомпрессором. Даже в секторе небольших автомобилей с дизельным двигателем наблюдается распространение турбокомпрессоров. Расширение производства материалов, обладающих высокими температурными характеристиками, улучшение качества моторных масел, применение жидкостного охлаждения корпуса турбокомпрессора, электронное управление регулирующими клапанами - все это способствует тому, что турбокомпрессоры стали использоваться на мелкосерийных бензиновых двигателях, что в сочетании с впрыском и электронным зажиганием позволило достичь очень высоких характеристик.

#### Особенности расчета характеристик компрессора.

Масса воздуха, перекачиваемая компрессором в единицу времени, величина постоянная и зависит от его конструктивных особенностей. Однако производительность принято определять не в массовых, а в объемных величинах, что часто приводит к

путанице и ошибкам в расчетах. Дело в том, что воздух, как и другие газы, сжимаем. Это означает, что одна и та же масса воздуха может занимать разный объем в зависимости от давления и температуры. Точная взаимосвязь между этими величинами описывается сложной степенной зависимостью. В случае *компрессора*, наполняющего ресивер, это означает, что с ростом давления в ресивере (на выходе компрессора) его объемная производительность уменьшается.

Согласно ГОСТ, производительность компрессора - это объем воздуха, выходящий из него, пересчитанный на физические условия всасывания. В большинстве случаев физические условия на входе в компрессор соответствуют нормальным: температура 20<sup>0</sup>С, давление 100 КПа. ГОСТ также допускает возможность отклонения реальных характеристик компрессора от указанных в паспортных данных на величину  $\pm 5\%$ . На нормальные условия пересчитывают и параметры потребителей *сжатого воздуха*, чтобы привести их к общему знаменателю с характеристиками источника. Поэтому, номинальный расход 100 л/мин означает, что при рабочем давлении *пневмоинструмент* за минуту потребляет такое количество воздуха, которое при нормальных условиях заняло бы объем, равный 100 литрам.

В паспортных данных на импортную технику указывается теоретическая производительность компрессора (производительность по всасыванию).

Теоретическая производительность определяется геометрическим объемом воздуха, который поместится в рабочей полости компрессора за один цикл всасывания, умноженный на количество циклов в единицу времени. Она отличается от реальной, выходной, в большую сторону. Отличие учитывается коэффициентом производительности (подачи) или наполнения, зависящим от условий всасывания и конструктивных особенностей *поршневого компрессора* - потерь во всасывающих и нагнетательных клапанах, наличия не до вытесненного, «мертвого», объема, приводящих к уменьшению наполнения цилиндра. Для *компрессоров* профессиональной серии коэффициент производительности может составлять величину от 0,6 до 0,7, причем большие значения соответствуют большей подаче. Точный расчет характеристик *поршневого компрессора* сложен и связан с решением степенных уравнений.



В поршневом компрессоре можно получить высокие степени повышения давления. В то же время при большой производительности получаются чрезвычайно большие размеры цилиндра и шатунно-кривошипного механизма. Это ведет к необходимости работать с малым числом оборотов, что затрудняет соединение компрессора с турбо- или электроприводом. Кроме того, сжимаемое тело загрязняется смазочным маслом. По изложенным причинам поршневые компрессоры применяют для малой производительности и высокой степени повышения давления.

В автосервисной практике находят применение в основном *поршневые* устройства. Конструктивно они представляют собой агрегат, включающий компрессорную головку, электропривод, ресивер и устройство автоматического регулирования давления (прессостат).

К основным характеристикам *компрессора* относятся два параметра - максимальное давление ( $P_{\text{макс}}$ ) и объемная производительность или подача ( $J_d = \frac{V_d}{\tau}$ ).

Примечание: *производительность (подача, расход)-изменение объёма за единицу времени.*

Большинство предлагаемых сегодня на рынке компрессоров развивают давление, превышающее потребности стандартного пневмооборудования и инструмента, используемого при авто-ремонте. На рынке представлены компрессоры с максимальным давлением 600, 800, 1000, 1300 кПа.

Примечание: на многих компрессорах кроме кПа указывается так же и давление в барах (1 бар=100 кПа) и в технических атмосферах,  $\frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$  ( $1 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} = 98 \text{ кПа}$ ). Номинальное рабочее давление *окрасочных пистолетов* 300-400 кПа, пневмоинструмента - до 650 кПа. Исключение составляет *пневмопривод* шиномонтажных станков, для которого некоторые производители рекомендуют использовать *сжатый воздух* при давлении 800-1000 кПа.

Следует иметь в виду, что система автоматического регулирования давления всех компрессоров настроена таким образом, что обеспечивает поддержание давления в ресивере с допуском (-200 кПа) от максимального значения. Это означает, что в процессе работы компрессора с  $P_{\text{макс}} = 800 \text{ кПа}$  давление на выходе мо-

жет изменяться в диапазоне от 600 до 800 кПа, у 1000-кПа-ского, - соответственно, от 800 до 1000 кПа.

Кроме того, необходимо учитывать, что наличие протяженных пневмомагистралей до потребителей сжатого воздуха вызывают падение давления в линии. При ошибках в проектировании пневмосети (применение труб малого диаметра, использование водопроводных запорных устройств, нерациональная прокладка магистралей и т. д.) оно может достигать существенной величины и стать причиной неэффективной работы *пневмооборудования*. Чтобы избежать возможных неприятностей в таких случаях, нужно отдать предпочтение компрессору с более высоким максимальным давлением.

Из сказанного следует, что в качестве универсального гаражного источника сжатого воздуха можно использовать компрессор с максимальным давлением 800 кПа. Если компрессор будет использоваться исключительно для окрасочных работ, можно обойтись и 600 кПа, а в случае разветвленных пневмосетей надежнее использовать компрессор, развивающий давление до 1000 кПа.

Некоторый запас по давлению полезен и с другой точки зрения. Чем выше давление, развиваемое компрессором, тем большую массу воздуха он может закачать в ресивер и тем большее время последний будет опорожняться до минимально допустимого давления, обеспечивая компрессору время для отдыха.

*Принципиальная схема и цикл одноступенчатого одноцилиндрового горизонтального компрессора* представлен на рис. 4.1.

При движении поршня 2 слева направо давление газа в цилиндре становится меньше давления во всасывающей трубке. Всасывающий клапан (клапаны обозначены цифрой 3) открывается и по мере движения поршня вправо полость цилиндра заполняется газом теоретически по линии 4-1. При обратном движении поршня справа налево всасывающий клапан закрывается и поршень сжимает газ теоретически по кривой 1-2, пока давление в цилиндре не достигнет давления  $P_2$ , равного давлению газа в нагнетательной линии трубопровода. Открывается нагнетательный клапан и поршень выталкивает газ в нагнетательную линию трубопровода при постоянном давлении  $P_2$  (линия 2-3). В начале нового хода поршня слева направо вновь открывается всасывающий клапан, давление в цилиндре падает с  $P_2$  до  $P_1$  теоретически

мгновенно (линия 3-4) и процесс повторяется. При рассмотрении идеального цикла поршневого компрессора принимают следующие допущения:

1. Отсутствуют сопротивления движению потока газа (в том числе и в клапанах).
2. Давление и температура газа во всасывающей и нагнетательной линиях постоянны.
3. Давление и температура газа в период всасывания, так же как и в период выталкивания газа из цилиндра, не меняются.
4. Мертвое (вредное) пространство в цилиндре компрессора отсутствует.
5. Нет потерь мощности на трение и нет утечек газа.

При изотермическом процессе газ сжимается по кривой 1-2"', при адиабатическом 1-2'', а при политропическом 1-2 или 1-2'. Рассматривая *политропический процесс* 1-2, видим, что за этот период цикла объем газа уменьшится с  $V_1$  до  $V_2$ , давление изменится от  $P_1$  до  $P_2$ , а температура - от  $T_1$  до  $T_2$ . При нагнетании газа в трубопровод (2-3) давление и температура газа остаются неизменными ( $P_2$  и  $T_2$ ). Весь объем газа  $V_2$  переходит в нагнетательный трубопровод. За период 3-4 в цилиндре снижается давление до давления во всасывающем трубопроводе ( $P_1$ ). *Период всасывания* (4-1) характеризуется постоянным давлением  $P_1$  и температурой газа  $T_1$ , в цилиндр поступает объем газа, равный  $V_1$ .

*Работа сжатия газа* от давления всасывания  $P_1$  до давления нагнетания  $P_2$  в цилиндре компрессора за время одного цикла характеризуется площадью индикаторной диаграммы, ограниченной линиями, которые соединяют точки 1-2-3-4. В случае идеального процесса, когда исключены все непроизводительные потери энергии, затрачиваемая энергия равна полезной. Таким образом, индикаторная диаграмма в этом случае дает величину затрачиваемой и полезной работы.

При изотермическом процессе газ сжимается без нагрева и выходит с меньшей температурой, чем при адиабатическом или политропическом процессах. Поскольку компрессор предназначен только для сжатия и перемещения газа, то повышение его температуры не является полезной частью работы. Поэтому изотермический процесс (без нагрева газа) более выгоден. При этом процессе на сжатие газа от давления  $P_1$  до давления  $P_2$  затрачивается меньше энергии (см. рис.4.1, площадь наименьшая). Од-

нако изотермический процесс трудно осуществить на практике, и компрессоры работают при политропическом или адиабатическом процессе.

При адиабатном сжатии работа сжатия максимальная. При политропном сжатии она меньше адиабатной работы, но больше изотермической (сравнить площади диаграмм 1-2'''-3-4, 1-2-3-4 и 1-2''-3-4). В реальном компрессоре в силу сопротивления нагнетательного клапана и трубопровода давление  $P_2^*$  (точка 2 на рис 4.2) в конце сжатия и при нагнетании выше давления  $P_2$  среды, куда происходит нагнетания. Поэтому нагнетание изобразится линией 2-3. Выступ 2 в начале нагнетания обусловлен инерцией нагнетательного клапана. От точки 3 рабочее тело, оставшееся во вредном пространстве, расширяется – линия 3-4 (рис.4.2), и реальная индикаторная диаграмма компрессора замыкается.

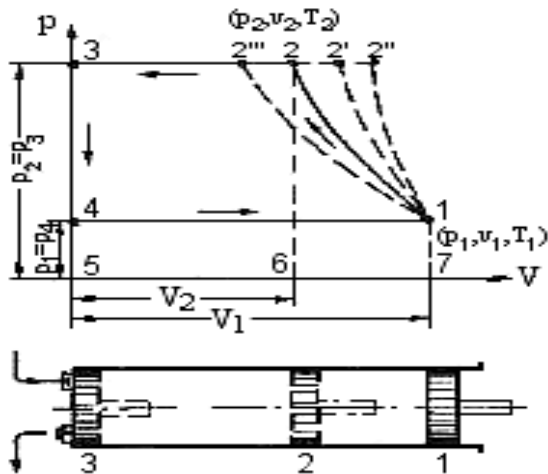


Рис.4.1. Принципиальная схема и идеальный цикл компрессора простого действия [2,3]

При поступлении в цилиндр рабочее тело получает тепло от стенок цилиндра, так как температура его при всасывании ниже температуры стенок. Кроме того, оно получает тепло от смешивания с газом или паром, оставшимся во вредном пространстве от предыдущего цикла работы и расширившимся до давления всасы-

вания  $P_1^*$ . Обозначения:  $V_{ц}$ ,  $V_h$  - полный и рабочий объёмы цилиндра;  $V_c$  - мертвое пространство;  $V_{c1}$  - объём расширения газа, оставшегося в мёртвом пространстве, при всасывании;  $P_1$ ,  $P_2$  и  $P_{вс}$   $P_{нг}$  – рабочие давления и давления в цилиндре при всасывании, нагнетании;  $\Delta P_{вс}$ ,  $\Delta P_{нг}$  - падение давления в нагнетательном и всасывающем клапанах. В результате температура рабочего тела  $T_1^*$  оказывается больше температуры среды  $T_1$ , из которой происходит всасывание. Поэтому объём рабочего тела, действительно всасываемого в цилиндр за один ход поршня, т.е. всасываемый объём при параметрах  $P_1^*$  и  $T_1^*$ , изображается на индикаторной диаграмме отрезком  $V_d$ . Рабочий объём цилиндра – объём между крайними положениями поршня – обозначен  $V_h$ .

Отношение  $\varphi = \frac{J_d}{J_T}$  (4-1) определяет уменьшение производительности компрессора, обусловленное наличием вредного пространства, понижением давления и повышением температуры при всасывании, и называется **о б ъ ё м н ы м** коэффициентом подачи компрессора, коэффициентом производительности. Его значения уменьшаются с ростом давления  $P_2$  и в пределе стремятся к 0. Так, из опытных данных следует, что при вредном объёме, составляющем 1% от рабочего объёма,  $\frac{V_{вп}}{V_h} = 0,01$ , предельное давление равно 22500 кПа, а если вредный объём составляет 3% от рабочего  $\frac{V_{вп}}{V_h} = 0,03$ , этот предел составляет уже только 7000 кПа. Из этого следует, что одноступенчатые поршневые компрессоры нельзя использовать для получения газа высокого давления. Для этого нужны многоступенчатые компрессоры.

Теоретическую производительность можно определить, зная параметры цилиндра (диаметр  $D$  и ход поршня  $h$ ) компрессора и его число оборотов за секунду ( $\omega$ ):

$$J_T = \frac{\pi D^2}{4} \cdot h \cdot \omega. \quad (4-2)$$

Примечание: в данной работе буквой **n** обозначается показатель политропы, поэтому для обозначения числа оборотов вала компрессора введём символ  $\omega$ .

Действительную производительность можно найти опытным путём, измеряя объём воздуха, выходящего из ресивера в нагнетательную линию за единицу времени при постоянных

значениях давления  $P_2$  и температуры  $T_2$ , приведенных к условиям всасывания:

$$J_d = \frac{V_d}{\tau} \quad (4-3)$$

Работа за цикл идеального компрессора складывается из работы всасывания (движение поршня от ВМТ к НМТ), работы сжатия до давления  $P_2$  и работы выталкивания сжатого воздуха в нагнетательную линию (или ресивер). Полную работу за цикл называют технической работой. При политропном сжатии (охлаждаемый компрессор) она больше работы по изменению объёма в  $n$  раз. Показатель политропы  $1 < n < 1,4$ .

Техническая работа  $l^*$  больше работы по изменению объёма при адиабатном расширении (или сжатии),  $l = \int P \cdot d v$ , в  $\gamma = 1,4$  раза.

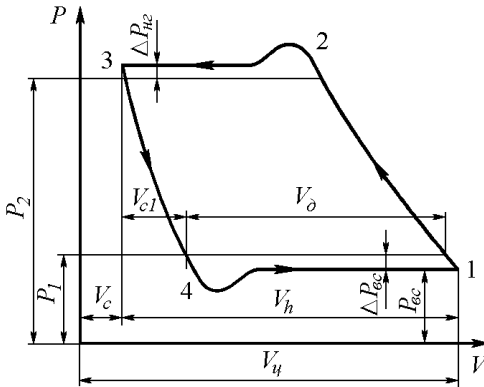


Рис. 4.2. Реальная индикаторная диаграмма поршневого компрессора.

При адиабатном сжатии идеальная удельная работа:

$$l_{ad} = \frac{P_1 \cdot v_1}{\gamma - 1} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right]; \quad l_{ad} = \frac{P_1 \cdot v_1}{\gamma - 1} \cdot \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1 \right] \quad (4-5)$$

Следует иметь ввиду, что адиабатная работа сжатия компрессора, согласно формуле  $l = \int P \cdot d v$ , должна быть отрицательной,  $d v < 0$ , но её на практике (для удобства) принято считать положительной и в квадратных скобках слагаемые меняют местами (см. формулу (4-5)).

Для идеального газа формулу (4-5) можно использовать и в следующем виде:  $l_{ad} = \frac{R_{\mu} \cdot T_1}{\gamma - 1} \cdot \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1 \right]$ .

Техническая работа компрессора находится из соотношения:

$$l_{ад}^* = \frac{(P_1 \cdot v_1) \cdot \gamma}{\gamma - 1} \cdot \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1 \right] = \frac{(R_{\mu} \cdot T_1) \cdot \gamma}{\gamma - 1} \cdot \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1 \right] \quad (4-6)$$

В предыдущих работах уже вводились значения показателя адиабаты ( $\gamma = 1,4$ ) и молярной универсальной газовой постоянной для воздуха:  $R_{\mu} = 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$

При политропном сжатии (охлаждаемый компрессор):

$$l_n^* = \frac{P_1 \cdot v_1 \cdot n}{n-1} \cdot \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right] = \frac{(R_{\mu} \cdot T_1) \cdot n}{n-1} \cdot \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right] \quad (4-7)$$

Показатель политропы можно найти, используя уравнение политропы:  $P_1 v_1^n = P_2 v_2^n$  или  $\left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{(1-\gamma)/\gamma} = \frac{T_2}{T_1}$  (4-8)

$$n = \frac{\ell n \frac{P_2}{P_1}}{\ell n \frac{v_1}{v_2}} \quad (4-9) \quad n = \frac{1}{1 + \frac{\ell n \frac{T_2}{T_1}}{\ell n \frac{P_2}{P_1}}}$$

Расчёты показывают, что обе формулы дают одинаковые результаты. Так как давления и температуры в работе определяются экспериментально, то вторая формула предпочтительнее для определения показателя политропы.

Значения удельных объёмов воздуха при давлениях  $P_1$  и  $P_2$  можно взять из справочных таблиц [1].

Разность  $l_{ад}^* - l_n^* = q$  (4-10) даёт значение удельной теплоты, отводимой при охлаждении компрессора. Действительно, при адиабатном сжатии, согласно первому началу термодинамики:  $l_{ад}^* = \Delta i$ . (4-11) При политропном сжатии:  $l_n^* = \Delta i - q$ . Отсюда и получается формула (4-10).

Мощность идеального компрессора при адиабатном сжатии:  $N_{ки}^{ад} = \rho_1 \cdot J_d \cdot l_{ад}^* = \frac{J_d \cdot l_{ад}^*}{v_1}$  (4-12)

где  $\rho_1 = \frac{1}{v_1}$  - плотность сжимаемого воздуха.

При политропном сжатии:

$$N_{ки}^n = \rho_1 \cdot J_d \cdot l_n^* = \frac{J_d \cdot l_n^*}{v_1} \quad (4-13)$$

Индикаторный к.п.д. компрессора определяется как отношение идеальной мощности (политропной) компрессора  $N_{ки}^п$  к его действительной мощности  $N_i$ , которую определяют, используя индикаторную диаграмму реального компрессора:

$$\eta_i = \frac{N_{ки}^п}{N_i}. \quad (4-14)$$

Приближённо индикаторную мощность компрессора можно оценить, используя опытные данные по индикаторному к.п.д. малых и средних воздушных компрессоров. Они обобщены в виде линейной зависимости от степени повышения давления

$$[4,7]: \quad \chi = \frac{P_2}{P_1}: \quad (4-15) \quad \eta_i = 0.95 - 0.004 \cdot \chi. \quad (4-16)$$

Действительную (индикаторную) мощность компрессора можно вычислить по формуле:

$$N_i = \frac{N_{ки}^п}{\eta_i}. \quad (4-17)$$

Используемый в работе компрессор имеет вентилятор для охлаждения, поэтому часть энергии, потребляемой из сети используется для приведения его в действие. Оценить степень приближения реальной установки к идеальной можно, рассчитав относительный к.п.д. установки:

$$\eta_{ку} = \frac{N_i}{N_{ку}} = \frac{N_i}{I \cdot U} \quad (4-18)$$

Значения силы тока  $I$  и напряжения  $U$  находятся с помощью амперметра и вольтметра.

### Выполнения работы

#### Задание 1. Изучить устройство стенда

Основу лабораторной установки составляет передвижной воздушный поршневой компрессор марки FX-95 производства Italia, с воздушным охлаждением (см. рис. 4.3), технические характеристики которого представлены в табл.4.1.

Давление измеряется с помощью манометра (класс точности 1.0), температура сжатого воздуха с помощью термопары и автоматического потенциометра с погрешностью  $1^0$ С.

Измерение комнатной температуры проводится с помощью жидкостного термометра с точностью  $1^0$ .

Действительная производительность определяется с помощью газового счётчика и секундомера. Погрешность измерения 1 л ( $0,001 \text{ м}^3$ ) и 1 сек соответственно.





Рис.4.3. Общий вид установки

Таблица 4.1. Технические характеристики компрессора

N n/n	Характеристики	Размерность	Значение
1	Модель		FX-95
2	Номинальная мощность электродвигателя	Вт	1100
3	Стандартная частота вращения	$\frac{1}{\text{мин}}$	2870
4	Диаметр цилиндра	мм	54x1
5	Рабочий объём цилиндра	см <sup>3</sup>	71,4
6	Теоретическая производительность	$\frac{\text{л}}{\text{мин}}$	205
7	Максимальное избыточное давление (при достижении-отключение)	кПа	800
8	Объём ресивера	л	24

### Требования к технике безопасности при работе с установкой

1. К выполнению работы допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности и правилам проведения работ в лаборатории теплотехники, ознакомившиеся с правилами безопасности и методикой проведения эксперимента.

2. Работа проводится только под контролем преподавателя или лаборанта.

3. Перед включением стенда необходимо убедиться в надежности изоляции всех его токоведущих элементов, исправности коммутирующих и измерительных приборов, наличии заземления.

4. Не производить работы на установке с нарушенной целостностью ограждений.

5. Во время опыта нельзя касаться металлических частей установки.

6. Не разрешается оставлять включенную установку без присмотра. Студентам запрещается производить любые действия, не предусмотренные методикой выполнения работы.

### **Задание 2. Провести измерения**

А) Включить установку в сеть и установить с помощью регулятора напряжений напряжение  $U$  в пределах 200-220 в.

Б) Полностью открыть вентиль на нагнетательном патрубке компрессора и включить компрессор с помощью кнопки «Пуск». Дать поработать компрессору несколько минут.

В) Установить давление  $P_2^{\text{изб}}$  на выходе компрессора в пределах 100-600 кПа с помощью выходного вентиля (закручивая его). Дать поработать компрессору несколько минут, поддерживая давление постоянным.

Г) Включить секундомер и измерить время  $\tau$  прохождения через счётчик объёма  $V_d$  (л) воздуха.

Записать в табл. 4.2 значения силы тока  $I$ , напряжения  $U$ , объёма воздуха  $V_d$ , времени его прохождения  $\tau$ , температуры сжатого воздуха  $t_2^0$ , давления сжатого воздуха  $P_2 = (P_2^{\text{изб}} + 100 \text{ кПа})$ , а также температуру воздуха в лаборатории  $t_1^0$ .

Д) Отключить установку. Открыть вентиль полностью, выпустить сжатый воздух из ресивера. Дать возможность охладиться компрессору и ресиверу до комнатной температуры.

Е) Прodelать подобные измерения 3 раза при различных значениях  $P_2^{\text{изб}}$ . Данные занести в табл. 4.2.

Ж) По окончании эксперимента отключить все приборы от сети.

### **Задание 3. Провести расчёты**

По результатам измерений произвести расчёты, используя формулы (4-2)-(4-18). Данные занести в табл.4.2. Сделать выводы.

### Пример проведения расчётов

**Опыт 1.** В эксперименте получены следующие значения физических величин: атмосферное давление при комнатной температуре принято равным  $P_1=P_{\text{атм}}=100$  кПа, температура комнатная  $t_1^0=20^0$  С. Давление в ресивере  $P_2=500$  кПа +100 кПа = 600 кПа, температура сжатого воздуха  $t_2^0=52^0$  С. Сила тока  $I=6,5$  А, напряжение  $U=200$  В. Объём сжимаемого воздуха  $V_0=64$  л =  $0,064$  м<sup>3</sup>, время  $\tau=60$  с.

Таблица 4.2. Результаты эксперимента и расчётов

N n/n	Наименование величин, размерность	1	2	3
1	Давление $P_1$ , кПа	100	100	100
2	Давление $P_2$ , кПа			
3	Температура $t_1^0$ , $^0$ С			
4	Температура $t_2^0$ , $^0$ С			
5	Объём действительный $V_{\text{д}}$ , м <sup>3</sup>			
6	Время $\tau$ , с			
7	Теоретическая производительность $J_{\text{теор}}$ , $\frac{\text{м}^3}{\text{с}}$			
8	Действительная производительность $J_{\text{д}}$ , $\frac{\text{м}^3}{\text{с}}$			
9	Удельный объём воздуха $v_1$ , $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$			
10	Удельный объём воздуха $v_2$ , $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$			
11	Коэффициент производительности, $\phi$			
12	Показатель политропы, $n$			
13	Удельная техническая работа (адиабатная) $l^*_{\text{ад}}$ , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$			

14	Удельная техническая работа (политропная) $l_{\text{п}}^*$ , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$			
15	Удельная теплота, отводимая от компрессора $q$ , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$			
16	Идеальная (политропная) мощность компрессора $N_{\text{ки}}^{\text{п}}$ , кВт			
17	Индикаторная мощность компрессора $N_i$ , кВт			
18	Мощность, потребляемая компрессорной установкой из сети $N_{\text{ку}} = I \cdot U$ , кВт			
19	Относительный к.п.д. компрессорной установки, $\eta_{\text{ку}}$			

А) Теоретическая производительность:  $\omega = 2870 \frac{1}{\text{мин}} = 47,83 \left(\frac{1}{\text{с}}\right)$ ;

$$J_{\text{т}} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot h \cdot \omega = 47,83 \left(\frac{1}{\text{с}}\right) \cdot 71,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 = 3,415 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{с}};$$

$$J_{\text{т}} = 205 \frac{\text{л}}{\text{мин}}.$$

Б) Действительная производительность :

$$J_{\text{д}} = \frac{V_{\text{д}}}{\tau} = \frac{0,064 \text{ м}^3}{60 \text{ с}} = 1,07 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{с}} = 64 \frac{\text{л}}{\text{мин}}.$$

В) Коэффициент производительности:

$$\varphi = \frac{J_{\text{д}}}{J_{\text{т}}} = \frac{64 \frac{\text{л}}{\text{мин}}}{205 \frac{\text{л}}{\text{мин}}} = 0,31$$

Г) Удельная работа при адиабатном сжатии воздуха:

$$l_{a0}^* = \frac{(100 \cdot 10^3 \text{ Па} \cdot 0,8408 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \cdot 1,4)}{1,4 - 1} \cdot \left[ \left( \frac{600 \text{ кПа}}{100 \text{ кПа}} \right)^{(1,4-1)/1,4} - 1 \right];$$

$$l_{a0}^* = 197 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Значения удельных объёмов воздуха при давлении  $P_1 = 100 \text{ кПа}$ , комнатной температуре  $t_1^0 = 20^\circ\text{C}$ , рабочем давлении

$P_2 = 600$  кПа и температуре  $t_2^0 = 52^0\text{C}$  взяты из справочника [1]:

$$v_1 = 0,8408 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}; \quad v_2 = 0,1554 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

Д) Политропная удельная работа по сжатию воздуха охлаждаемым компрессором:

$$l_n^* = \frac{(P_1 \cdot v_1) \cdot n}{n-1} \cdot \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right]; \quad \text{показатель политропы можно}$$

найти из формулы (4-9):

$$n = \frac{\ell n \frac{600 \text{ кПа}}{100 \text{ кПа}}}{\ell n \frac{0,8408}{0,1554}} = 1,062.$$

$$l_n^* = \frac{(100 \text{ кПа} \cdot 0,8408 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}) \cdot 1,062}{1,062 - 1} \cdot \left[ \left( \frac{600 \text{ кПа}}{100 \text{ кПа}} \right)^{(1,062-1)/1,062} - 1 \right];$$

$$l_{\text{п}}^* = 158 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Е) Отводимая удельная теплота:

$$q = l_{\text{ад}}^* - l_{\text{п}}^* = 197 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} - 158 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} = 39 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Ж) Мощность идеального компрессора при адиабатном сжатии:

$$N_{\text{ки}}^{\text{ад}} = \rho_1 \cdot J_{\text{д}} \cdot l_{\text{ад}}^* = \frac{J_{\text{д}} \cdot l_{\text{ад}}^*}{v_1}.$$

$$N_{\text{ки}}^{\text{ад}} = \frac{1,07 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{с}} \cdot 197 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}}{0,8408 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}} = 251 \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = 251 \text{ Вт}.$$

З) При политропном сжатии:  $N_{\text{ки}}^{\text{п}} = \rho_1 J_{\text{д}} l_{\text{п}}^* = \frac{J_{\text{д}} \cdot l_{\text{п}}^*}{v_1}.$

$$N_{\text{ки}}^{\text{п}} = \frac{1,07 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{с}} \cdot 158 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}}{0,8408 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}} = 201 \text{ Вт}.$$

И) Индикаторная мощность охлаждаемого компрессора:

$$N_i = \frac{N_{\text{ки}}^{\text{п}}}{\eta_i} = \frac{201 \text{ Вт}}{0,93} = 216 \text{ Вт}.$$

$$\eta_i = 0,95 - 0,004 \cdot \chi = 0,93.$$

К) Относительный к.п.д. компрессорной установки:

$$\eta_{\text{кУ}} = \frac{N_i}{N_{\text{кУ}}} = \frac{N_i}{I \cdot U} = \frac{216 \text{ Вт}}{6,5 \text{ А} \cdot 200 \text{ В}} = 0,17.$$

## Выводы

### **Контрольные вопросы**

1. Объясните принцип работы воздушного компрессора.
2. Изобразите идеальный цикл работы (теоретическую  $Pv$ -диаграмму) поршневого компрессора и объясните, из каких процессов он состоит.
3. Объясните, в чём отличие теоретической и действительной индикаторной диаграммы компрессора.
4. Сравните удельную работу при изотермическом, адиабатном и политропном процессах сжатия. Какая из них больше и почему?
5. Объясните, в чем назначение ресивера.
6. Зачем нужно охлаждение цилиндров компрессора?

### **Лабораторная работа № 5**

#### **Изучение рабочих процессов бензиновых двигателей**

**Цель работы:** познакомиться с устройством, принципом действия и теплотехническими расчётами характеристик бензинового двигателя (ДсИЗ-двигателя с искровым зажиганием).

**Приборы и оборудование:** учебный стенд.

#### ***Краткие теоретические сведения***

Двигатели внутреннего сгорания, в цилиндрах которых предварительно сжатая топливовоздушная смесь поджигается электрической искрой, называют двигателями с искровым зажиганием (ДсИЗ) [5]. Функция автомобильного бензинового двигателя состоит в том, чтобы заставить автомобиль двигаться. В настоящее время самый легкий способ - это сжигание бензина внутри двигателя. Отсюда и название автомобильного двигателя - двигатель внутреннего сгорания.

Внутреннее сгорание наиболее эффективно (требуется меньше топлива на километр пути), чем внешнее сгорание (например, в паровых двигателях). Двигатель внутреннего сгорания намного меньше, чем эквивалентный внешний двигатель внутреннего сгорания. Принцип работы любого двигателя

внутреннего сгорания: при помещении очень малого количества высокоэнергетического топлива (например, бензина) в маленькое замкнутое пространство и воспламенении его, получается большое количество энергии, выпущенной в форме расширенного газа. Эту энергию можно использовать полезно, если создать определенный цикл, в котором процессы сгорания топлива и расширения газа будут производиться сотни раз в минуту, приводя в действие коленчатый вал. В настоящее время на большинстве двигателей современных автомобилей используется четырехтактный цикл работы, при котором преобразовывается энергия сжигания топлива в полезную энергию.

Основная часть двигателя - это цилиндр с поршнем внутри, перемещающимся вверх- вниз во внутренней стороне. Одноцилиндровые двигатели обычно устанавливаются на газнокосилки и т.п. У автомобилей: 4-х, 6-и, 8-и цилиндровые двигатели. В многоцилиндровых двигателях цилиндры могут размещаться по

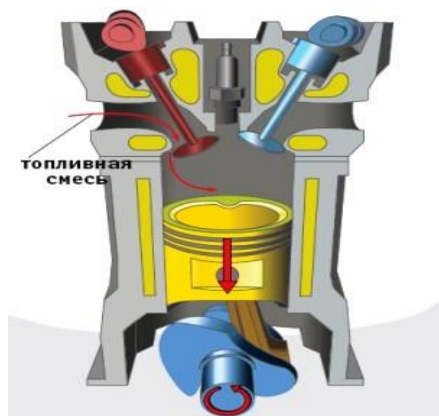


Рис.5.1. Схема поршневого 4-х тактного бензинового двигателя (такт 1-впуск)

разному. Основные способы: рядный, V-образный. Различные типы двигателей имеют свои преимущества и недостатки с точки зрения вибрации, компактности, стоимости производства и дру-

гих факторов. Эти плюсы и минусы учитываются для постройки соответствующих транспортных средств.

*Четырехцилиндровый рядный двигатель.* Самый простой двигатель. Располагается в ряд нужное количество цилиндров — получается необходимый рабочий объем. Рядная "четверка" попала в самый массовый диапазон рабочего объема легковых автомобилей — от 1,0 до 2,3 л.

*V-образный шестицилиндровый двигатель.* Такие моторы, у которых цилиндры расположены в виде латинской буквы V, вдвое короче рядных — наибольшее распространение получили двигатели с углом развала блока 60 и 90 градусов.

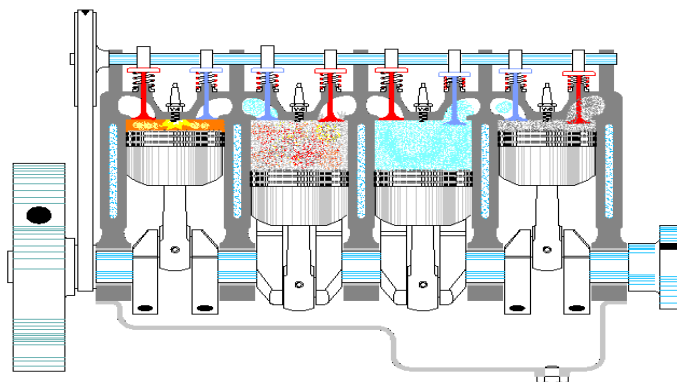


Рис.5.2. Четырехцилиндровый бензиновый ДВС (такты: сгорание топлива, расширение горючих газов, впуск топливовоздушной смеси и выпуск отработанных газов)

Четырехтактный цикл бензинового ДСИЗ известен как цикл Отто (Otto), в честь Николауса Отто (Nikolaus Otto), который изобрел двигатель внутреннего сгорания в 1867 году.

Цикл Отто на диаграмме P-v имеет следующий вид:  
а-1 (1-й такт) – в цилиндр через всасывающий клапан поступает смесь воздуха и паров горючего (процесс в цикл не входит);  
1-2 (2-ой такт) – адиабатное сжатие (повышается температура);



2-3 – сгорание горючей смеси, давление быстро возрастает при постоянном объеме (подвод теплоты  $q_1$ );

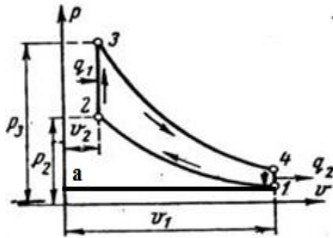


Диаграмма цикла Отто

3-4 (3-й такт) – адиабатное расширение (рабочий процесс, совершается полезная работа);

4-1- открывается выхлопной клапан и отработанные газы покидают цилиндр, давление в цилиндре падает (отводится тепло  $q_2$ ).

Термический к.п.д. двигателя определяется как отношение количества тепла ( $q_1 - q_2$ ), превращённого в полезную работу ( $l_{ц}$ ), к теплоте, выделяемой при сгорании топлива  $q_1$ :

$$\eta_T = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{l_{ц}}{q_1}. \quad (5-1)$$

Удельная работа за цикл:

$$l_{ц} = l_{1-2} + l_{2-3} + l_{3-4} + l_{4-1} = l_{1-2} + l_{3-4}.$$

В изохорных процессах работа равна 0 ( $l_{2-3} = 0$ ,  $l_{4-1} = 0$ ). Удельная работа при адиабатном сжатии определяется из формулы:

$$l_{1-2} = \frac{R_{\mu} \cdot T_1}{\gamma - 1} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right]$$

Согласно первому началу термодинамики:

$$q = \Delta u + l = c_v \cdot (t_2^0 - t_1^0) + l = \frac{c_v^{\mu}}{\mu} \cdot (t_2^0 - t_1^0) + l = \frac{5}{2} \cdot R_{\mu} \cdot (t_2^0 - t_1^0) + l.$$

$$q_1 = \frac{5}{2} \cdot R_{\mu} \cdot (t_3^0 - t_2^0); \quad q_2 = \frac{5}{2} \cdot R_{\mu} \cdot (t_1^0 - t_4^0).$$

Используя определение степени сжатия рабочего тела ( $\epsilon = \frac{v_1}{v_2}$ ), записанные выше формулы для нахождения удельной работы за цикл и уравнения для термических параметров процессов,

входящих в цикл, можно формулу (5-1) для термического к.п.д. двигателя Отто преобразовать в следующее выражение:

$$\eta_{\Gamma} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\gamma-1}}. \quad (5-2)$$

Чем выше  $\varepsilon$ , тем выше экономичность ДВС);  $\gamma$  – показатель адиабаты ( $\gamma = 1,4$  для идеального газа).  $v_1$  и  $v_2$  – начальное и конечное значения удельных (или полных) объёмов рабочего тела.

Значения к.п.д., полученные по формуле (5-2), получаются завышенными по сравнению с реальными к.п.д. и максимально возможными для бензиновых двигателей с данным значением степени сжатия рабочего тела. Но эти величины позволяют изобретателям и конструкторам ориентироваться на них при усовершенствовании двигателя.

#### *Определение рабочих характеристик ДсИЗ.*

Теоретически, используя законы технической термодинамики, рассчитать к.п.д. реального ДВС сложно. Следует так же учитывать, что кроме к.п.д., развиваемого рабочим телом в цилиндре под поршнем реального ДВС, важно уметь определять и к.п.д. на валу двигателя. Поэтому для реальных ДВС определяют два к.п.д., индикаторный- в цилиндре под поршнем, и эффективный – на валу двигателя. С этой целью экспериментально снимается зависимость давления в цилиндре под поршнем от угла поворота коленвала,  $P = f(\alpha)$ , а затем эта зависимость переводится в зависимость давления рабочего тела от его объёма  $P = f(V)$ . Полученные данные позволяют построить диаграмму  $P$ -  $V$ . Она носит название индикаторной диаграммы. Снятие индикаторных диаграмм производится с целью определения развиваемой двигателем мощности, равномерности распределения нагрузки по цилиндрам, а так же выявления ненормальностей в работе двигателя [9,11].

Для снятия индикаторных диаграмм применяются индикаторы различных типов. В последние годы широкое применение получило индицирование двигателей с помощью

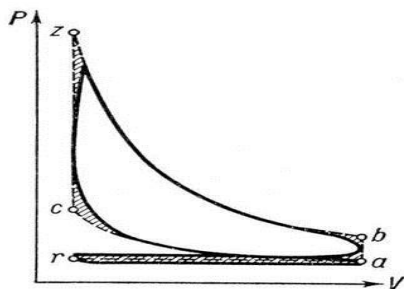


Рис.5.3. Примерный вид индикаторной диаграммы [5]

тензометрической аппаратуры, при этом индикаторная диаграмма записывается в память компьютера и выводится на экран (или на специальную фотобумагу в осциллографе). На развёрнутой индикаторной диаграмме фиксируются мёртвые точки (НМТ- нижняя мёртвая точка; ВМТ-верхняя мёртвая точка), атмосферная линия ( $P_0$ ) и масштаб [11]. Для определения среднего индикаторного давления эту развёрнутую диаграмму (см.рис. 5.4) графическим способом перестраивают в координаты P-V. На диаграмме 5.5. точка С соответствует началу процесса горения топлива. Чтобы положение этой точки было более отчётливым, на диаграмме вычерчивают линию расширения без горения (показана штриховой линией), т.е. при выключенном топливном насосе.

Если на диаграмму нанести две вспомогательные линии (показаны штрих-пунктиром) и таким образом зафиксировать положение точки С, а также величины давления  $P_c$  и  $P_z$ , то очевидно, что любое отклонение от такой эталонной диаграммы станет сразу же заметным. Подобная диаграмма должна быть снята с цилиндра, на котором точно отрегулированы фазы газообмена и подачи топлива в соответствии с инструкциями завода-изготовителя. Для анализов процессов наполнения и выпуска двигателей снимают отдельные индикаторные диаграммы. Для удобства ведения расчётов и сопоставления между

собой разных двигателей переменные по ходу поршня давления

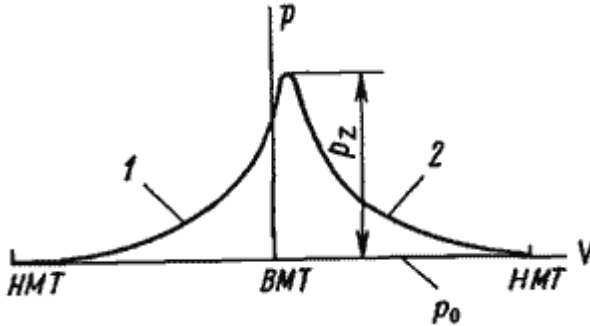


Рис.5.4. Развёрнутая индикаторная диаграмма: 1-сжатие; 2-горение и расширение

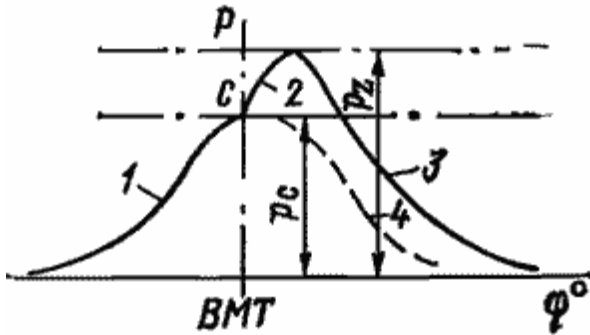


Рис.5.5. Смешанная индикаторная диаграмма: 1-сжатие; 2-горение; 3-расширение; 4-расширение без горения.

заменяются условным постоянным давлением, при котором за один ход поршня получается работа, равная работе газов за цикл с переменным давлением. Это постоянное давление называется *средним индикаторным давлением* и представляет собой работу газов, отнесённую к рабочему объёму поршневой машины.

$$\text{Следовательно } P_i = \frac{L_i}{V_h} \quad (5-3)$$

Здесь  $L_i$  - работа газов за цикл;  $V_h$ , - рабочий объём цилиндра.

Индикаторной мощностью  $N_i$  называют работу, совершаемую газами в цилиндрах двигателя в единицу времени.

Индикаторная работа (Дж), совершаемая газами в одном цилиндре за один рабочий цикл:  $L_i = P_i \cdot V_h$ . Так как число рабочих циклов, совершаемых двигателем в секунду, равно  $\frac{2\omega}{\kappa}$ , то индикаторная мощность (кВт) одного цилиндра:

$$N_i = \frac{2}{\kappa} \cdot L_i \cdot \omega \cdot 10^{-3} \text{ (кВт)} = \left(\frac{2}{\kappa}\right) \cdot P_i \cdot V_h \cdot \omega \cdot 10^{-3} \text{ (кВт)}, \quad (5-4)$$

где  $\omega$  - частота вращения коленчатого вала  $\frac{1}{c}$ ,  $\kappa$  - тактность двигателя - число тактов за цикл ( $\kappa = 4$  для четырехтактных двигателей и  $\kappa = 2$  для двухтактных). Работа за цикл определяется в джоулях. Индикаторная мощность многоцилиндрового двигателя при числе цилиндров  $z$ :

$$N_i = \frac{2}{\kappa} \cdot L_i \cdot \omega \cdot z \cdot 10^{-3} \text{ (кВт)}, \quad (5-5)$$

Для нахождения индикаторной мощности надо знать значения индикаторной работы за цикл, как это следует из формулы (5-5). Её можно оценить, используя результаты индицирования двигателя. При индицировании двигателя получают зависимость текущего индикаторного давления от угла поворота коленвала  $P_i = f(\alpha)$ . Для перевода зависимости  $P_i = f(\alpha)$  в зависимость индикаторного давления от текущего объема  $P_i = f(V_i)$  можно использовать полуэмпирические соотношения:

$$V_i = \frac{V_a}{\varepsilon} \cdot \left(1 + \frac{\varepsilon - 1}{2} \cdot \sigma\right) \quad (5-6)$$

Здесь  $\sigma$  – кинематическая функция,  $V_a$ -полный объем цилиндра.

$$V_a = V_h \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \quad (5-7) \quad V_h - \text{рабочий объем цилиндра, } \varepsilon - \text{степень сжатия,}$$

$$\sigma = 1 + \frac{1}{\lambda} - \cos \alpha - \frac{1}{\lambda} \cdot \sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \alpha}. \quad (5-8) \quad \alpha - \text{угол}$$

поворота коленчатого вала (п.к.в.), отсчитываемый от верхней мертвой точки (в.м.т.), град,  $\lambda$  – отношение радиуса кривошипа к длине шатуна.

Используя значения таблицы функции  $P_i = f(V_i)$ , можно рассчитать значения индикаторной работы за цикл, используя формулу:

$$L_i = L_{ay} + L_{yb} \quad (5-9)$$

Индикаторная работа цикла  $L_i$ , Дж, определится как сумма работ сжатия и горения-расширения. Поскольку при сжатии рабочего тела затрачивается энергия и объем рабочего тела в цилиндре уменьшается, работа процесса сжатия будет отрицательной, в то время, как работа процессов сгорания-расширения будет положительной.

В общем случае, при изменении давления от  $P_{j-1}$  до  $P_j$ , объем меняется от  $V_{j-1}$  до  $V_j$ . Здесь  $j$  – целое число, от 2 до  $a$  (где  $a$  - число элементарных участков разбиения процессов). Работа для данного процесса суммируется для всех участков:

$$L = 10^3 \cdot \sum_{j=1}^a \frac{P_{j-1} + P_j}{2} \cdot (V_j - V_{j-1}) \quad (5-10)$$

Среднее индикаторное давление можно найти из формулы (5-3).

Эффективной мощностью  $N_e$  называют мощность, снимаемую с коленчатого вала двигателя для получения полезной работы. Эффективная мощность меньше индикаторной  $N_i$  на величину мощности механических потерь  $N_m$ , т.е.

$$N_e = N_i - N_m. \quad (5-11)$$

Знание индикаторной и эффективной мощности позволяет определить мощность механических потерь  $N_m$ .

Мощность механических потерь затрачивается на трение при приведении в действие кривошипно-шатунного механизма, механизма газораспределения, вентилятора, жидкостного, масляного и топливного насосов, генератора тока и других вспомогательных механизмов и приборов. Механические потери в двигателе оцениваются механическим к.п.д.  $\eta_m$ , который представляет собой отношение эффективной мощности к индикаторной, т.е.

$$\eta_m = \frac{N_e}{N_i} = \frac{N_i - N_m}{N_i} = 1 - \frac{N_m}{N_i}. \quad (5-12)$$

Для современных двигателей механический к.п.д. составляет 0.72 - 0.90 [5].

$$\text{Из формулы: } N_m = \frac{2}{\kappa} \cdot P_m \cdot V_h \cdot \omega \cdot z \cdot 10^{-3}, \quad (\text{кВт}) \quad (5-13)$$

можно определить  $P_m$  - среднее давление механических потерь, т.е. часть среднего индикаторного давления, которая расходуется на преодоление трения и на привод вспомогательных механизмов и приборов.

Разность между средним индикаторным давлением  $P_i$  и средним давлением механических потерь  $P_m$  называют средним эффективным давлением:

$$P_e = P_i - P_m. \quad (5-14)$$

Эффективная мощность двигателя:

$$N_e = \frac{2 \cdot P_e \cdot V_h \cdot \omega \cdot z}{\kappa} \cdot 10^{-3} \quad (\text{кВт}), \quad (5-15)$$

откуда среднее эффективное давление:

$$P_e = \frac{10^3 \cdot N_e \cdot \kappa}{2 \cdot V_h \cdot \omega \cdot z} \quad (5-16)$$

Среднее эффективное давление при нормальной нагрузке у четырехтактных карбюраторных двигателей 750 - 950 кПа [5].

Индикаторный к.п.д. оценивает степень использования теплоты в действительном цикле с учетом всех тепловых потерь и представляет собой отношение теплоты  $Q_i$ , эквивалентной полезной индикаторной работе, ко всей затраченной теплоте  $Q$  (затраченной работе), т.е.  $\eta_i = \frac{Q_i}{Q}$ . Теплота  $Q_i$  (кВт) эквивалентна индикаторной работе за время  $\tau = 1\text{с}$  (индикаторной мощности):  $N_i = \frac{Q_i}{\tau}$  (5-17)

Теплота  $Q$  (кВт), затраченная на работу двигателя в течение 1с (затраченная мощность)  $Q = V \cdot (Q_p^h)$ , где  $V$  - расход топлива, кг/с;  $Q_p^h$  - низшая рабочая теплота сгорания топлива, кДж/кг. Подставляя значение  $Q_i$  и  $Q$  в равенство (5-7), получим:

$$\eta_i = \frac{N_i}{B \cdot (Q_H^p)} \quad (5-18)$$

Удельный индикаторный расход топлива  $\left[ \frac{\text{кг}}{\text{кВт}\cdot\text{ч}} \right]$  представляет собой отношение часового расхода топлива  $B_{\text{ч}}$  к индикаторной мощности  $N_i$  (кВт),

$$\text{т.е. } b_i = \frac{B_{\text{ч}}}{N_i} \frac{\text{кг}}{\text{кВт}\cdot\text{ч}} \text{ или } b_i = \frac{B_{\text{ч}}}{N_i} \cdot 10^3 \frac{\text{г}}{\text{кВт}\cdot\text{ч}} \quad (5-19)$$

У карбюраторных двигателей индикаторный к.п.д. составляет 0,28-0,35 [5]. Удельный индикаторный расход топлива для карбюраторных двигателей равен (0,245-0,30)  $\frac{\text{кг}}{\text{кВт}\cdot\text{ч}}$  [5]. Экономичность работы двигателя в целом определяют эффективным к.п.д.  $\eta_e$  и удельным эффективным расходом топлива  $b_e$ .

Эффективный к.п.д. оценивает степень использования теплоты топлива с учетом всех видов потерь, как тепловых так и механических, и представляет собой отношение теплоты  $Q_e$ , эквивалентной полезной эффективной работе, ко всей затраченной теплоте  $B \cdot Q$ , т.е.:

$$\eta_e = \frac{N_e}{B \cdot (Q_H^p)} \cdot \quad (5-20)$$

Удельный эффективный расход топлива  $\left( \frac{\text{кг}}{\text{кВт}\cdot\text{ч}} \right)$  представляет собой отношение часового расхода топлива  $B_{\text{ч}}$  к эффективной мощности  $N_e$ , т.е.  $b_e = \frac{B_{\text{ч}}}{N_e} \frac{\text{кг}}{\text{кВт}\cdot\text{ч}}$ , или

$$b_e = \frac{B_{\text{ч}}}{N_i} \cdot 10^3 \frac{\text{г}}{\text{кВт}\cdot\text{ч}} \cdot \quad (5-21)$$

Для поршневых карбюраторных двигателей эффективный к.п.д. составляет 0,25-0,29 [5]. Значения удельного эффективного расхода топлива составляют для карбюраторных двигателей (0,22-0,48)  $\frac{\text{кг}}{\text{кВт}\cdot\text{ч}}$  [5].

Значения перечисленных выше величин, характеризующих работу ДВС, для современных двигателей, использующих



более совершенные технологии ( прямой впрыск топлива, обеспечивающий более полное сгорание топлива, применение двух и более клапанов на цилиндр и т.п) оказываются более высокими (удельные расходы топлива соответственно более низкими).

### **Выполнение работы**

#### **Задание 1. Изучить устройство стенда**

Одноцилиндровый карбюраторный четырехтактный бензиновый двигатель воздушного охлаждения 1Ч 5.8 х 4.8 (Subaru EX 13) с измерительной аппаратурой и нагрузочным устройством установлен на фундаментной раме со свободным доступом к изучаемым узлам и агрегатам. Принципиальная схема лабораторного стенда представлена на рис. 5.7 Нагрузочное устройство гидравлического типа, включающее масляный бак емкостью 20 л, масляный насос шестеренчатого типа, механический дроссель и рукоявка высокого и низкого давления, имеет соединение с валом отбора мощности двигателя при помощи специального устройства измерения вращающего (крутящего) момента коленчатого вала.

Получение характеристики холостого хода выполняется при полностью открытом дросселе нагрузочного устройства. Объяснить это можно следующим образом. Из теории шестеренчатых гидромашин известно, что мощность, передаваемая валу насоса от двигателя, зависит от давления насоса и его производительности (объемной подачи). С уменьшением объемной подачи путём закрытия дросселя эта мощность растёт. Следовательно, должна расти и мощность, развиваемая двигателем. Полная мощность, передаваемая от вала двигателя валу насоса, является эффективной мощностью для двигателя:

$$N_e = N_H = M \cdot 2\pi\omega.$$

Измерения величины момента  $M$  и числа оборотов двигателя позволяют найти эффективную мощность двигателя. Её легко изменить, регулируя подачу насоса с помощью рукоятки дросселя. На рис.5.6. рукоятка дросселя расположена справа от манометра. Она позволяет изменять мощность на валу

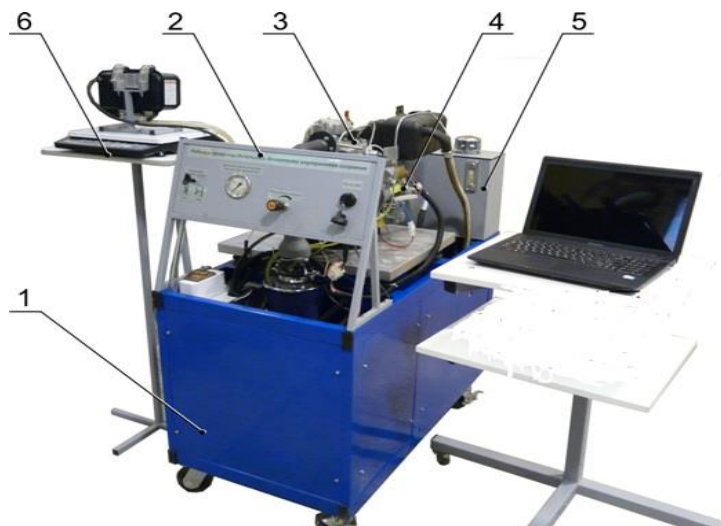


Рис.5.6. Общий вид стенда для изучения рабочих процессов бензиновых двигателей: 1 – фундаментная рама; 2 – панель управления стендом; 3 поршневой двигатель; 4 – нагрузочное устройство; 5 – масляный бак; 6 – трубопроводы; 7 – стойка ЭВМ

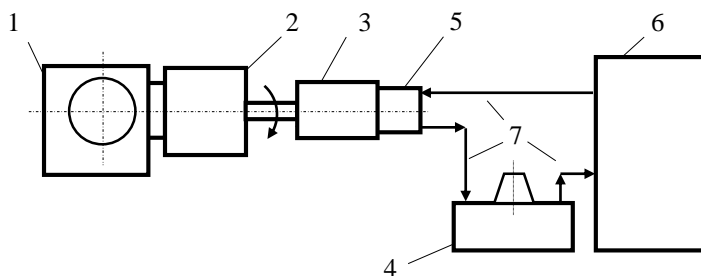


Рис.5.7. Принципиальная схема лабораторного стенда «Рабочие процессы бензиновых двигателей»:

1. поршневой двигатель; 2. измеритель крутящего момента;
3. нагрузочный масляный насос; 4. теплообменник;
5. нагрузочный дроссель; 6. масляный бак; 7. трубопроводы низкого давления

двигателя (эффективную), от режима холостого хода до режима номинальной нагрузки 2.8 кВт. Слева от манометра показана рукоятка подачи топлива. Она позволяет регулировать число оборотов двигателя до номинального (3600 об/мин.). Манометр измеряет давление масла на выходе гидронасоса.

Измерение момента на валу двигателя (или насоса) является одной из не простых технических задач. В данной работе его измеряют с помощью специальной тензометрической балки в режиме реального времени и с выводом результатов на экран компьютера. Для измерения и контроля основных показателей двигателя в комплект поставки стенда входит измерительная аппаратура, позволяющая измерить 12 параметров работающего двигателя (см. табл. 5.1.)

На рис. 5.9-5.11 даны фото компьютерной системы регистрации данных работающего бензинового двигателя.

Стенд позволяет в режиме реального времени определять:

- частоту вращения коленчатого вала ( $\frac{1}{\text{мин}}$ );
- вращающий момент коленчатого вала (н·м);
- эффективную мощность двигателя (кВт);
- часовой расход топлива ( $\frac{\text{кг}}{\text{час}}$ );
- удельный эффективный расход топлива ( $\frac{\text{г}}{\text{кВт} \cdot \text{час}}$ );
- температуру смазочного масла ( $^{\circ}\text{C}$ );
- температуру свежего заряда ( $^{\circ}\text{C}$ );
- температуру отработавших газов ( $^{\circ}\text{C}$ );
- разряжение во впускном трубопроводе (кПа);
- давление в выпускном трубопроводе до системы снижения шума (кПа);
- давление в выпускном трубопроводе после системы снижения шума (кПа).

Измерение расхода топлива осуществляется с помощью электронных весов (см.рис.5.12). Результаты выдаются на экран

компьютера в виде удельного эффективного расхода топлива (см.рис.5.10) и массы топлива в измерительном бачке.



Рис.5.8. Передняя панель стенда с регуляторами числа оборотов, мощности двигателя и манометром

Табл.5.1. Измерительная аппаратура лабораторной установки

Наименование	
Датчик давления рабочего тела в цилиндре двигателя -	1 шт
Датчик разрежения во впускном трубопроводе	1 шт
Датчик давления отработавших газов	2 шт
Датчик температуры смазочного масла	1 шт
Датчик температуры отработавших газов	1 шт
Датчик температуры свежего заряда	1 шт
Датчик массового расхода воздуха во впускной системе	1 шт

- Оптический измеритель температуры деталей двигателя 1 шт  
 Весовое устройство для измерения массового расхода топлива 1 шт  
 Датчик частоты вращения коленчатого вала 1 шт  
 Датчик температуры масла нагруженного устройства 1 шт  
 Датчик усилия в блоке измерения вращающего момента 1 шт

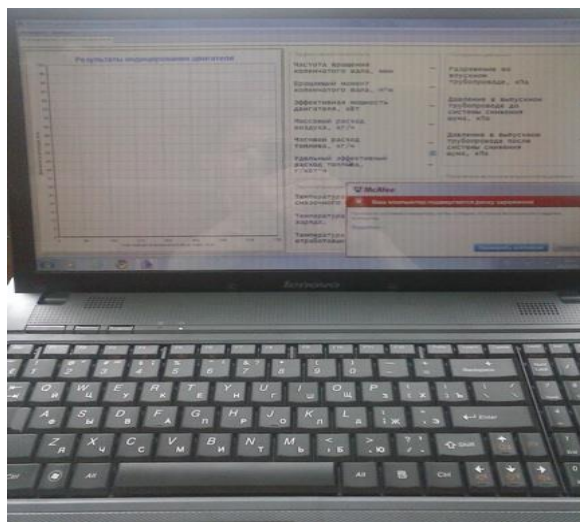


Рис. 5.9. Общий вид компьютерной системы регистрации данных

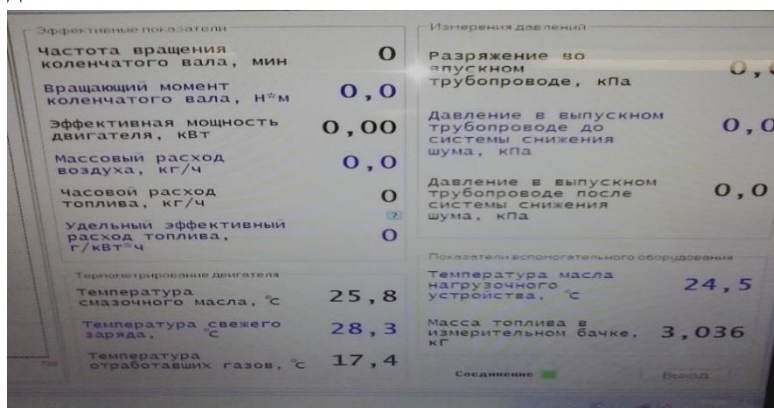


Рис.5.10. Правая часть экрана в увеличенном виде

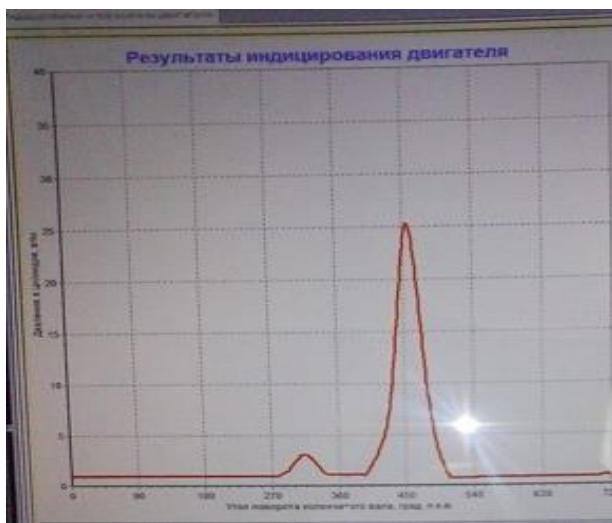


Рис.5.11. Левая часть экрана в увеличенном виде (индцирование двигателя)



Рис.5.12. Бачок с топливом на электронных весах



Рис.5.13. Системный электронный блок станда

Электронный блок, расположенный в левой нижней части станда (рис.5.13), играет важную роль в получении данных. Он осуществляет обработку данных всех датчиков и выводом их на экран компьютерной системы.

Запуск двигателя осуществляется вручную с помощью специального шнура (см. рис.5.14). Отвод отработавших газов осу-



Рис.5.14. Запуск двигателя с помощью специального шнура

ществляется за пределы зала лаборатории при помощи специальных газоотводящих трубопроводов.

Табл.5.2. Технические характеристики лабораторного стенда

№	Наименование параметра	Значение параметра
1.	Номинальная мощность исследуемого двигателя, не более, кВт	2,8
2.	Номинальная частота вращения коленчатого вала, не более, мин <sup>-1</sup>	3600
3.	Номинальный крутящий момент коленчатого вала исследуемого двигателя, не более, Н·м	8
4.	Мощность двигателя при максимальном крутящем моменте, не более, кВт	2,2
5.	Частота вращения коленчатого вала при максимальном крутящем моменте, не более, мин <sup>-1</sup>	2600
6.	Максимальный крутящий момент коленчатого вала исследуемого двигателя, не более, Н·м	8,1
7.	Максимальное давление в гидросистеме насоса-нагрузателя, не более, кПа	10000
8.	Максимальный расход нагрузочного масла насоса-нагрузателя, не более, $\frac{\text{л}}{\text{мин}}$	15
9.	Емкость бака гидросистемы насоса-нагрузателя, не более, л	20
10.	Диаметр цилиндра, мм -	58
11.	Ход поршня, мм –	48
12.	Рабочий объём цилиндра , см <sup>3</sup>	126
13.	Степень сжатия	8,5
14.	Радиус кривошипа, мм	24



**До начала проведения эксперимента необходимо тщательно изучить меры предосторожности при работе со стендом.!!**  
Они приведены в Инструкции к стенду.

**ЗАПРЕЩАЕТСЯ:**

-запускать двигатель и проводить лабораторные работы в помещении, не предназначенном для испытаний двигателей (оборудование для отвода отработавших газов, система вентиляции и пожаротушения, водоснабжения и оказания первой медицинской помощи, а также вспомогательный инвентарь являются обязательными к установке);

- производить какие-либо лабораторные, ремонтные и (или) регулировочные работы (за исключением предусмотренных в регламенте проведения лабораторных работ) на стенде с работающим двигателем;

- использовать топлива, смазочные материалы, охлаждающие и специальные жидкости, не предусмотренные техническими условиями на дизель 1Ч 5,8 × 4,8;

- подключать к двигателю дополнительное оборудование, вносить самостоятельные изменения в конструкцию двигателя и (или) его нагрузочного устройства без предварительного письменного согласия предприятия-изготовителя;

- эксплуатировать стенд при неисправной электрической проводке;

- проводить любые работы и мероприятия с использованием открытого огня (сварочные работы, курение, разведение костров и т.п.) в непосредственной близости от стенда;

- при работе двигателя располагаться или располагать посторонние предметы рядом с подвижными элементами стенда.

**Задание 2. Подготовить стенд к проведению испытаний и провести эксперимент**

А) Проверить наличие масла в двигателе и нагрузочном устройстве.

Б) Убедиться, что нагрузочный дроссель полностью открыт.

В) Включить электронные весы в сеть, снять бачок с топливом и обнулить весы. (Бачок должен быть заполнен на 3,4; при необходимости долить неэтилированного бензина в бачок).

Г) Включить компьютер и электронный блок в сеть. Запустить программное обеспечение (при помощи «ярлыка» на «рабочем» столе компьютера). Подождать 2...3 мин для автоматической калибровки оборудования (дождаться исчезновения символов «><» на индикаторной панели ЭВМ. Обнулить показания датчиков (команда F2 или из меню «Установки»).

Примечание: Меню «Установки» содержит команду «*Корректировка нуля*», быстрый доступ к которой, обеспечивается клавишей F2. Использование данной команды является *обязательной* процедурой, выполняемой непосредственно перед проведением испытаний, после прогрева двигателя и нагрузочного устройства и выполнения автоматической калибровки датчиков. Перед выполнением «*Корректировки нуля*» двигатель необходимо остановить, если он работал, а затем запустить вновь.

Меню «Данные» содержит следующие команды:

- «*Добавить текущие показатели в буфер*»;
- «*Отменить последнее добавление в буфер*»;
- «*Добавить показатели в буфер вместе с результатами индцирования*»;
- «*Сохранить показатели в файл и очистить буфер ...*».

Указанные команды используются для оперативной регистрации измеряемых параметров двигателя и формирования протокола испытаний.

Д) Установить бачок на весы.

Е) Запустить двигатель с помощью шнура и в режиме минимальной нагрузки (регулируется с помощью дросселя нагрузочного устройства) прогреть двигатель до температуры смазочного масла 55<sup>0</sup>-60<sup>0</sup>С. Остановить двигатель. Провести «корректировку нуля» и обнулить весы.

Ж) Запустить двигатель, установить нагрузку двигателя примерно 30-70% от максимальной и снять показания с помощью команды «Добавить показатели в буфер вместе с результатами индицирования».

Остановить двигатель уменьшая подачу топлива левой рукояткой до нуля.

З) Показатели эксперимента вместе с результатами индицирования из памяти компьютера перенести в табл. 5.3, 5.4.

Табл. 5.3. Показатели работы двигателя

N n/n	Наименование показателя	Номер опыта	
		1	2
1	Число оборотов коленвала $\omega$ , $\frac{1}{\text{мин}}$		
2	Вращающий момент коленчатого вала М, Н·м		
3	Эффективная мощность двигателя $N_e$ , кВт		
4	Часовой расход топлива $V_{\text{ч}}$ , $\frac{\text{кг}}{\text{ч}}$		
5	Удельный эффективный расход топлива $b_e$ , $\frac{\text{кг}}{\text{кВт}\cdot\text{ч}}$		
6	Температура масла нагрузочного устройства, °С		
7	Разряжение во впускном трубопроводе, кПа		
8	Давление в выпускном трубопроводе до системы снижения шума, кПа		

9	Давление в выпускном трубопроводе после системы снижения шума, кПа		
10	Температура смазочного масла, °С		
11	Температура отработавших газов, °С		
12	Среднее эффективное давление $P_e$ , кПа		
13	Эффективный к.п.д. $\eta_e$		
14	Индикаторная работа за цикл $L_i$ , Дж		
15	Индикаторная мощность $N_i$ , кВт		
16	Среднее индикаторное давление $P_i$ , кПа		
17	Индикаторный к.п.д. $\eta_i$		
18	Мощность механических потерь $N_m$ , кВт		
19	Удельный индикаторный расход топлива $b_i$ , $\frac{\text{кг}}{\text{кВт}\cdot\text{ч}}$		
20	Среднее давление механических потерь $P_m$ , кПа		
21	Механический к.п.д. $\eta_m$		

Таблица 5.4. Результаты индицирования (зависимость давления в цилиндре под поршнем от угла поворота коленвала за цикл).

Угол повор. $\alpha^0$	Давление, кПа	Угол повор. $\alpha^0$	Давление, кПа	Угол повор. $\alpha^0$	Давление, кПа



$b_e = 400 \frac{\Gamma}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$ , а так же значения функции  $P_i = f(\alpha)$  в интервале  $0^\circ - 720^\circ$  поворота коленвала, т.е за один цикл работы двигателя.

А) Среднее эффективное давление:

$$P_e = \frac{10^3 \cdot N_e \cdot \kappa}{2 \cdot V_H \cdot \omega \cdot z} \cdot 10^3 = \frac{0,81 \cdot 10^3 \cdot 4}{2 \cdot 126 \cdot 10^{-6} \cdot 30,5 \cdot 1} \text{ Па};$$

$$P_e = 4,2 \cdot 10^5 \text{ Па} = 420 \text{ кПа}.$$

Здесь  $V_H = 126 \text{ см}^3$  - рабочий объём цилиндра, согласно паспорта на двигатель,  $\kappa = 4$  - число тактов.

Б) Эффективный к.п.д.:

$$\eta_e = \frac{N_e}{V_{\text{ч}} \cdot (Q_H^p)} = \frac{810 \text{ Вт} \cdot 3600 \text{ с}}{0,32 \text{ кг} \cdot 44 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}} = 0,21$$

$V_{\text{ч}}$  - часовой расход топлива;  $Q_H^p = 44 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}} = 44 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$  - удельная теплота сгорания бензина (низшая рабочая теплота сгорания).

В) Используя данные табл.5.4, 5.5, значения степени сжатия  $\epsilon$ , полного объёма цилиндра (ф-ла 5-7), а также значения  $\sigma$ , рассчитанные по формуле (5-8), пересчитать значения  $P_i = f(\alpha)$  в  $P_i = f(V)$  по формуле (5-6):

$$V_i = \frac{V_a}{\epsilon} \cdot \left( 1 + \frac{\epsilon - 1}{2} \cdot \sigma \right).$$

Здесь  $\sigma$  - кинематическая функция,  $V_a$  - полный объём цилиндра.  $V_a = V_H \cdot \frac{\epsilon}{\epsilon - 1}$ ,  $V_H = \frac{\pi D^2}{4} \cdot h$  - рабочий объём цилиндра;  $D$  и  $h$  - диаметр цилиндра и ход поршня),

$$\sigma = 1 + \frac{1}{\lambda} - \cos \alpha - \frac{1}{\lambda} \cdot \sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \alpha}. \quad \alpha - \text{угол поворота}$$

коленчатого вала (п.к.в.), отсчитываемый от верхней мертвой точки (в.м.т.), град,  $\lambda$  - отношение радиуса кривошипа к длине шатуна (данные приведены в табл.5.2). Данные занести в табл.5.5. Для расчётов удобно использовать программу MS Excel. Данные занести в табл.5.5.




	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	уг.п.кол.в						σ		Тек.объём		Давл.
2	90*6,28/360		COS(A2)		SIN(A2)^2		5-C2-(16-E2)^0,5		0,0137+0,1096*G2		1,013
3	180*6,28/360		COS(A3)		SIN(A3)^2		5-C3-(16-E3)^0,5		0,0137+0,1096*G3		1,358
4	270*6,28/360		COS(A4)		SIN(A4)^2		5-C4-(16-E4)^0,5		0,0137+0,1096*G4		2,74
5	5,233333		0,497699		0,752295264		0,597469608		0,079183		7,92
6	5,407778		0,640684		0,589524001		0,433698079		0,061233		11,978
7	5,582222		0,764221		0,415965657		0,288116721		0,045278		19,317

Рис.5.18.Пример использования MS Excel для перевода значений  $P = f(\alpha)$   $P = f(V)$

Е) Индикаторная мощность двигателя (ф-ла 5-5):

$$N_i = \frac{2}{\kappa} \cdot L_i \cdot \omega \cdot z \cdot 10^{-3} \text{ (кВт)} = \frac{2}{4} \cdot 70 \cdot 30,5 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \text{ (кВт)} = 1,1 \text{ кВт.}$$

Ж) Индикаторный к.п.д. (ф-ла 5-18):

$$\eta_i = \frac{N_i}{V_{\text{ч}} \cdot (Q_H^p)} = \frac{1100 \text{ Вт} \cdot 3600 \text{ с} \cdot \text{кг}}{0,32 \text{ кг} \cdot 44 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}} = 0,28$$

З) Для идеального цикла бензинового карбюраторного двигателя термический к.п.д. равен:

$$\eta_{\tau} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\gamma-1}} = 1 - \frac{1}{(8,5)^{1,4-1}} = 1 - \frac{1}{2,35} = 1 - 0,43 = 0,57.$$

И) Удельный индикаторный расход топлива  $b_i$  (ф-ла 5-19):

$$b_i = \frac{V_{\text{ч}}}{N_i} \frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}} \text{ или } b_i = \frac{V_{\text{ч}}}{N_i} \cdot 10^3 \frac{\text{г}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}.$$

$$b_i = \frac{0,32}{1,1} \frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}} = 0,29 \frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}.$$



Механические показатели рассчитываются по формулам (5-11), (5-12) и (5-14):

К) Мощность механических потерь  $N_m$ , кВт:

$$N_m = N_i - N_e = 1,1 \text{ кВт} - 0,81 \text{ кВт} = 0,29 \text{ кВт}.$$

Тек.объём	Давл.	A2-A3	(C2+C3)*10^5/2	E2*F2
0,212886	1,013	0,008712	114250	995,346
0,221598	1,272	0,006257	140150	876,9186
0,227855	1,531	0,003772	140150	528,6458
0,231627	1,272	0,001273	135850	172,9371
0,2329	1,445	-0,00123	148800	-182,726
0,231672	1,531	-0,00373	144450	-538,221
0,227946	1,358	-0,00621	140150	-870,612
0,221734	1,445	-0,00867	148800	-1289,8
0,213066	1,531	-0,01106	157400	-1740,69

Рис.5.19. Пример использования MS Excel для нахождения индикаторной работы за цикл  $L_i$

Л) Среднее давление механических потерь:

$$P_m = P_i - P_e = 560 \text{ кПа} - 420 \text{ кПа} = 140 \text{ кПа}.$$

М) Механический к.п.д.:

$$\eta_m = \frac{N_e}{N_i} = \frac{N_i - N_m}{N_i} = 1 - \frac{N_m}{N_i} = 1 - \frac{0,29 \text{ кВт}}{1,1 \text{ кВт}} = 0,74.$$

Полученные данные занести в табл. 5.3.

Провести сравнение со справочными данными для ДсИЗ полученных значений индикаторного и эффективного к.п.д., среднего индикаторного и эффективного давлений, удельного индикаторного и эффективного расходов топлива, а так же механических показателей. Сделать выводы.

## Выводы

## **Контрольные вопросы**

1. Назвать измерительную аппаратуру, применяемую при испытаниях двигателя.
2. Объяснить, какими способами измеряется расход топлива в работе.
3. Какие эффективные показатели определяются при испытаниях двигателя?
4. Какие параметры работы двигателя можно найти, проводя индицирование двигателя?
5. Поясните методику определения индикаторной работы за цикл.
6. Чем эффективная мощность отличается от индикаторной и каким образом она определяется в работе?

## **Лабораторная работа № 6**

### **Изучение рабочих процессов дизельных двигателей**

**Цель работы:** познакомиться с устройством, принципом действия дизельного двигателя и методикой определения его рабочих характеристик.

**Приборы и оборудование:** стенд.

#### ***Краткие теоретические сведения***

*Дизеля* (или просто *дизель*) — поршневой двигатель внутреннего сгорания, работающий по принципу самовоспламенения распылённого топлива от воздействия разогретого при сжатии воздуха. Топливом для дизеля могут служить все фракции нефтеперегонки, от керосина до мазута, и некоторые продукты природного происхождения — рапсовое масло, пальмовое масло и т.п. Дизель может с определённым успехом работать и на сырой нефти. Такие *особенности дизеля, как экономичность, высокий крутящий момент во всем диапазоне оборотов, и особенно на низких частотах вращения, а также доступное топливо*, делают его предпочтительным вариантом для внедорожника, предназначенного для работы в тяжелых условиях.

С конца 90-х годов начался новый рост популярности дизельных моторов, связанный с совершенствованием их конструкции, внедрением электроники в системы топливопередачи и управления двигателем. Современные дизели последних поколений вплотную приблизились к бензиновым моторам по шумности и удельным характеристикам (вес, мощность на единицу объема), сохраняя при этом преимущества в экономичности и надежности.

*Конструктивные особенности.* По конструкции дизельный двигатель не отличается от обычного бензинового - те же цилиндры, поршни, шатуны. Клапанные детали существенно усилены, чтобы воспринимать более высокие нагрузки, так как степень сжатия у него намного выше (19-24), чем у бензинового (9-11). Этим объясняется большой вес и габариты дизельного двигателя в сравнении с бензиновым. *Принципиально отличие заключается в способах формирования топливно-воздушной смеси, ее воспламенения и сгорания.* У бензинового мотора смесь образуется во впускной системе, а в цилиндре воспламеняется искрой свечи зажигания. В дизельном двигателе подача топлива и воздуха происходит раздельно. Вначале в цилиндры поступает чистый воздух. В конце сжатия, когда он нагревается до температуры 700-800 °С, в камеру сгорания форсунками, под большим давлением (10-30 МПа) впрыскивается топливо, которое почти мгновенно самовоспламеняется. Самовоспламенение сопровождается резким нарастанием давления в цилиндре, что приводит к повышению шумности и жесткости работы дизеля. Такая организация рабочего процесса позволяет использовать более дешевое топливо и работать на очень бедных смесях, что определяет более высокую экономичность. Экологические характеристики такого двигателя тоже лучше, так как при работе на бедных смесях выбросы вредных веществ, особенно оксида углерода, заметно меньше, чем у бензиновых двигателей. К специфическим *недостаткам дизельных двигателей относят вибрацию, меньшую литровую мощность и трудности холодного пуска.* Следует, однако, отметить, что это относится в большей степени к старым конс-

трукциям, а в современных эти проблемы уже не являются столь очевидными.

Для дизельного двигателя рассматриваются два цикла:

- а) с подводом теплоты при постоянном давлении (компрессорный дизель);
- б) со смешанным подводом теплоты при постоянном объеме (бескомпрессорные дизели).

Первый цикл носит название цикла Дизеля, по имени изобретателя дизельного двигателя. Этот цикл характеризуется подводом теплоты (сгоранием топлива) по изобаре, т. е. при постоянном давлении в цилиндре двигателя. Если быть точнее, циклом Дизеля его называть будет не совсем справедливо. Изначально Р. Дизель предлагал осуществлять сжигание топлива по изотерме (как в идеальном цикле Карно) и запатентовал именно такой способ подвода тепла к рабочему телу. Однако, уже первые практические испытания показали, что цикл, предложенный Р. Дизелем, не имеет никакого практического и теоретического значения. Всякое приближение процессов горения к изотерме в цикле Дизеля приводило к увеличению расхода топлива. И лишь некоторое время спустя анализ диаграммы рабочего цикла дизельного двигателя, построенного в России на заводе "Л.Нобеля" показал, что линия сгорания топлива в нем протекает по изобаре. При этом достигался наиболее высокий к.п.д. Тем не менее, название цикл Дизеля установилось и навсегда связано с именем знаменитого изобретателя конструкции тепловых двигателей уникального типа.

Цикл Дизеля (компрессорный дизель) протекает следующим образом (рис.6.1):

a-1 (1-ый такт) изобарный впуск воздуха. В цикл не входит. 1-2 (2-ой такт). Сжатие осуществляется по адиабате, как и в цикле Отто, с той лишь разницей, что степень сжатия и давление в конце такта значительно выше.

2-3 - горение топлива (подвод тепла  $q_1$ ). В конце такта сжатия происходит впрыск топлива и начинается его горение (подвод теплоты), которое осуществляется по изобаре, т. е. при постоянном давлении. В этом заключается принципиальное отличие цикла Дизеля от цикла Отто, где теплота подводится изохорно (при постоянном объеме), поскольку топливо сгорает очень быстро, а его воспламенение (от искры) начинается чуть раньше (опережение зажигания), чем поршень достигал верхнего положения.

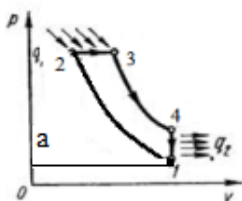


Рис.6.1. Диаграмма цикла Дизеля

Изобарное сжигание топлива в дизельном двигателе связано с относительно медленным (лавинообразным) воспламенением— сначала сгорают легкие фракции, затем более тяжелые. В результате процесс горения растягивается во времени и поршень успевает "убежать" от верхней мертвой точки, при этом давление в цилиндре остается неизменным.

3-4- следующий такт, третий, рабочий ход. Как и в цикле Отто, следовало адиабатическое расширение.

4-1- (4-ый такт) изохорный отвод теплоты  $q_2$  (выпуск газов и продувка цилиндра после открывания клапанов).

Кoeffициент полезного действия цикла Дизеля можно определить следующим образом:

$$\eta_{\Gamma} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\gamma-1}} \cdot \frac{\Psi^{\gamma} - 1}{\gamma \cdot (\rho - 1)} ; \quad \Psi = \frac{V_3}{V_2} = \frac{v_3}{v_2}$$
 - степень предварительного расширения рабочего тела в результате горения при постоянном давлении;  $\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$  - степень сжатия,  $\gamma = 1,4$  - показатель адиабаты.

В 30-х гг. прошлого века начался повсеместный переход от пневматического (компрессорного) на механическое (бескомпрессорное) распыливание топлива и соответственно с цикла Дизеля на цикл Тринклера. В настоящее время двигатели, работающие по "чистому" циклу Дизеля не производятся, за исключением экспериментальных и опытных образцов.

Цикл Тринклера (рис.6.2) имеет следующий вид:

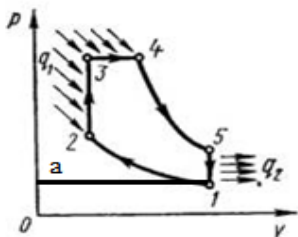


Рис.6.2. Диаграмма цикла Тринклера

а-1- (1-ый такт) воздух поступает в цилиндр при постоянном давлении. В цикл не входит.

1-2 –(2-ой такт) чистый воздух с температурой  $t_1^0$  сжимается до температуры  $t_2^0$ , которая больше температуры воспламенения воздуха. В этот момент в цилиндр через форсунки под давлением впрыскивается топливо;

2-3 – горючая смесь самовоспламеняется и к рабочему телу подводится тепло  $q_1^*$ , давление повышается до  $P_3$ ;

3-4 – поршень перемещается обратно, поступление и сгорание топлива продолжается при постоянном давлении и подводится тепло  $q_1^{**}$ . Теплота  $q_1 = q_1^* + q_1^{**}$ ;

4-5 –(третий такт) поршень продолжает перемещаться в нижнюю мертвую точку, давление падает (адиабатное расширение, рабочий ход);

5-1 – (4-ый такт) процесс отвода теплоты  $q_2$  при постоянном объеме (через выпускной клапан цилиндр покидают отработанные газы).

Термический к.п.д. цикла:  $\eta_T = \frac{l_{ц}}{q_1}$ . Удельная работа за

цикл:  $l_{ц} = q_1 - q_2$ . Её так же можно определить, рассчитывая удельную работу в каждом процессе:

$$l_{ц} = l_{1-2} + l_{2-3} + l_{3-4} + l_{4-5} + l_{5-1}; \quad l_{ц} = l_{1-2} + 0 + l_{3-4} + l_{4-5} + 0;$$

$$l_{ц} = l_{1-2} + l_{3-4} + l_{4-5}.$$

Работа адиабатного сжатия:

$$l_{1-2} = \frac{R \cdot T_1}{(\gamma - 1) \cdot \mu} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right].$$

В изобарном процессе работа:  $l_{3-4} = P_3 \cdot (v_4 - v_3)$ .

При адиабатном расширении удельная работа:

$$l_{4-5} = \frac{R \cdot T_4}{(\gamma - 1) \cdot \mu} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{P_5}{P_4} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right].$$

Используя приведенные выше формулы, а также первое начало термодинамики  $q = \Delta u + l = c_v \cdot (t_2^0 - t_1^0) + l$  и уравнения процессов, можно получить следующее уравнение для нахождения термического к.п.д. цикла Тринклера:

$$\eta_T = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{(\gamma-1)}} \cdot \frac{\chi \cdot \psi^\gamma - 1}{[(\chi-1) + \chi \cdot \gamma \cdot (\psi-1)]}. \quad (6-1)$$

Здесь  $\chi = \frac{P_3}{P_2}$  - степень повышения давления в результате изохорного горения;  $\psi = \frac{V_4}{V_3}$  - степень предварительного расширения рабочего тела в результате горения при постоянном давлении;  $\varepsilon$  - степень сжатия.

В последние годы на гибридных автомобилях используют идею, которую *Джеймс Аткинсон* предложил ещё в 1886 году. Что же такое *цикл Аткинсона*? [6,7] Основное отличие, относительно обычной 4-тактной работы двигателя – это изменение продолжительности этих тактов. В традиционном двигателе все 4 такта (впуск, сжатие, рабочий ход и выпуск) одинаковы. Аткинсон сделал 2 первых такта короче, а 2 других длиннее и реализовал это за счет изменения длины ходов поршней. Считается, что его модификация двигателя была производительней традиционной на 10%. В то время его изобретение не нашло широкого применения, т.к. обладало массой недостатков, основным из которых явилась сложность

этого изобретения – соединение поршней посредством оригинального кривошипно-шатунного механизма. Позднее в 1947 году американский инженер *Ральф Миллер* смог решить эту задачу по-другому (рис. 6.3). Такт сжатия был сокращен посредством внесения изменений в работу клапанов. Обычно на впуске открывается впускной клапан, и к наступлению такта сжатия он уже закрыт. Но в *цикле Миллера* впускной клапан продолжает находиться в открытом положении некоторую часть такта сжатия. Таким образом, часть смеси удаляется из камеры.

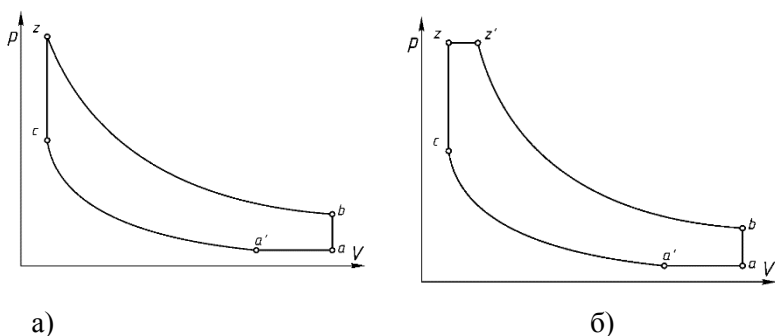


Рис. 6.3. Цикл Актинсона-Миллера для двигателя с искровым зажиганием (а) и цикл Миллера для двигателя с самовоспламенением (б)

сгорания, само сжатие начинается позже и соответственно его степень оказывается ниже. В сравнении с тактом сжатия, такты рабочий ход и выпуск оказываются продолжительнее. Именно они и влияют на к.п.д. двигателя. Рабочий ход определяет силу тяги, а затянувшийся выпуск лучше сохраняет энергию выхлопных газов. *Второй такт условно разделился на 2.* Такую схему иногда называют *пятитактным* двигателем. В первой части (слева) впускной клапан открыт и происходит вытеснение смеси, затем он закрывается (справа) и только тогда происходит компрессия (сжатие).. Это приводит с следующим эффектам:  
а) смесь сгорает с большим к.п.д.;



- б) двигатель прогревается быстрее, т.к. выхлопные газы дольше остаются в цилиндре;
- в) меньше вредных выбросов в атмосферу;
- г) меньший расход топлива, т.к. часть смеси выталкивается из цилиндра на такте сжатия;
- д) это же приводит к небольшой потере максимальной мощности, относительно традиционного ДВС;
- е) небольшой момент на малых оборотах. Последний пункт компенсируется тяговитым электродвигателем, в паре с которым и трудится сегодня *двигатель, работающий по циклу Аткинсона*. Большинство гибридов агрегируется именно таким ДВС. Несмотря на то, как реализована в XXI веке работа этого двигателя, название он носит именно в честь своего первооткрывателя из XIX века – *Джеймса Аткинсона*.

*Определение рабочих характеристик дизельного двигателя.*

Для снятия индикаторных диаграмм (рис.6.4) применяются индикаторы различных типов. В последние годы широкое применение получило индицирование двигателей с помощью тензометрической аппаратуры, при этом индикаторная диаграмма (построенная по значениям функции  $P_i = f(\alpha)$ ) записывается в память компьютера в виде рисунка. Там же записана и таблица  $P_i = f(\alpha)$  в численном виде.

Индикаторные и рабочие характеристики дизельного двигателя определяются так же, как и бензинового (карбюраторного) двигателя.

Среднее индикаторное давление представляет собой работу газов, отнесённую к рабочему объёму дизельного двигателя:

$$P_i = \frac{L_i}{V_h} . \quad (6-2)$$

Здесь  $L_i$ - работа газов за цикл;  $V_h$  - рабочий объём цилиндра.

Индикаторной мощностью  $N_i$  называют работу, совершаемую газами в цилиндрах двигателя в единицу времени.

Индикаторная работа (Дж) , совершаемая газами в одном цилиндре за один рабочий цикл:  $L_i = P_i \cdot V_h$ . Так как число рабочих циклов, совершаемых двигателем в секунду, равно  $\frac{2\omega}{\kappa}$ , то индикаторная мощность (кВт) одного цилиндра:

$$N_i = \frac{2}{\kappa} \cdot L_i \cdot \omega \cdot 10^{-3} \text{ (кВт)} = \frac{2}{\kappa} \cdot P_i \cdot V_h \cdot \omega \cdot 10^{-3} \text{ (кВт)}, \quad (6-3)$$

где  $\omega$ - частота вращения коленчатого вала ( $\frac{1}{C}$ ),  $\kappa$  - тактность двигателя - число тактов за цикл ( $\kappa = 4$  для четырехтактных двигателей и  $\kappa = 2$  для двухтактных). Работа за цикл определяется в джоулях. Индикаторная мощность многоцилиндрового двигателя при числе цилиндров  $z$ :

$$N_i = \frac{2}{\kappa} \cdot L_i \cdot \omega \cdot z \cdot 10^{-3} \text{ (кВт)}. \quad (6-4)$$

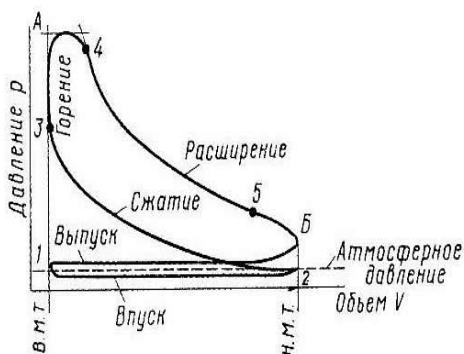


Рис.6.4.Примерный вид индикаторной диаграммы для дизель [5]

Для нахождения индикаторной мощности надо знать значения индикаторной работы за цикл, как это следует из формулы (6-4). Её можно оценить , используя результаты индицирования двигателя. При индицировании двигателя получают зависимость текущего индикаторного давления от угла поворота коленвала  $P_i = f(\alpha)$ . Для перевода зависимости  $P_i = f(\alpha)$  в зависимость индикаторного давления от текущего объёма  $P_i = f(V_i)$  используются следующие соотношения:

$$V_i = \frac{V_a}{\varepsilon} \cdot \left( 1 + \frac{\varepsilon - 1}{2} \cdot \sigma \right). \quad (6-5)$$

Здесь  $\sigma$  – кинематическая функция,  $V_a$ -полный объём цилиндра.

$$V_a = V_h \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1}. \quad (6-6)$$

$V_h$  - рабочий объём цилиндра,  $\varepsilon$  – степень сжатия,

$$\sigma = 1 + \frac{1}{\lambda} - \cos \alpha - \frac{1}{\lambda} \cdot \sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \alpha}. \quad (6-7)$$

$\alpha$  - угол поворота коленчатого вала (п.к.в.), отсчитываемый от верхней мертвой точки (в.м.т.), град.,  $\lambda$  – отношение радиуса кривошипа к длине шатуна. Используя значения таблицы функции  $P_i = f(V_i)$ , можно рассчитать значения индикаторной работы за цикл, используя формулу:  $L_i = L_{ay} + L_{yb}$  (6-8)

Индикаторная работа цикла  $L_i$ , Дж, определится как сумма работ сжатия и горения-расширения. Поскольку при сжатии рабочего тела затрачивается энергия и объём рабочего тела в цилиндре уменьшается, работа процесса сжатия будет отрицательной, в то время, как работа процессов сгорания-расширения будет положительной.

В общем случае, при изменении давления от  $P_{j-1}$  до  $P_j$ , объём меняется от  $V_{j-1}$  до  $V_j$ . Здесь  $j$  – целое число, от 2 до  $a$  (где  $a$  - число элементарных участков разбиения процессов).

Работа для данного процесса суммируется для всех участков:

$$L = 10^3 \cdot \sum_{j=1}^a \frac{P_{j-1} + P_j}{2} \cdot (V_j - V_{j-1}). \quad (6-9)$$

Среднее индикаторное давление можно найти из формулы (6-2).

Эффективной мощностью  $N_e$  называют мощность, снимаемую с коленчатого вала двигателя для получения полезной работы. Эффективная мощность меньше индикаторной  $N_i$  на величину мощности механических потерь  $N_m$ , т.е.

$$N_e = N_i - N_m. \quad (6-10)$$

Знание индикаторной и эффективной мощности позволяет определить мощность механических потерь  $N_m$ .

Мощность механических потерь затрачивается на трение при приведении в действие кривошипно-шатунного механизма, механизма газораспределения, вентилятора, жидкостного, масляного и топливного насосов, генератора тока и других вспомогательных механизмов и приборов. Механические потери в двигателе оцениваются механическим к.п.д.  $\eta_m$ , который представляет собой отношение эффективной мощности к индикаторной, т.е.

$$\eta_m = \frac{N_e}{N_i} = \frac{N_i - N_m}{N_i} = 1 - \frac{N_m}{N_i}. \quad (6-11)$$

Для современных дизельных двигателей механический к.п.д. составляет 0.75 - 0.85 [5].

Из формулы:  $N_m = \frac{2}{\kappa} \cdot P_m \cdot V_h \cdot \omega \cdot z \cdot 10^{-3}$ , (кВт) (6-12)

можно определить  $P_m$  - среднее давление механических потерь, т.е. часть среднего индикаторного давления, которая расходуется на преодоление трения и на привод вспомогательных механизмов и приборов.

Разность между средним индикаторным давлением  $P_i$  и средним давлением механических потерь  $P_m$  называют средним эффективным давлением:

$$P_e = P_i - P_m. \quad (6-13)$$

Эффективная мощность двигателя:

$$N_e = \frac{2 \cdot P_e \cdot V_h \cdot \omega \cdot z}{\kappa} \cdot 10^{-3} \text{ (кВт)}, \quad (6-14)$$

откуда среднее эффективное давление:

$$P_e = \frac{10^3 \cdot N_e \cdot \kappa}{2 \cdot V_h \cdot \omega \cdot z}. \quad (6-15)$$

Среднее эффективное давление при нормальной нагрузке у четырехтактных дизельных двигателей 650 - 1600 кПа [5].

Индикаторный к.п.д. оценивает степень использования теплоты в действительном цикле с учетом всех тепловых потерь и представляет собой отношение теплоты  $Q_i$ , эквивалентной полезной индикаторной работе, ко всей затраченной теплоте  $Q$  (затраченной работе), т.е.  $\eta_i = \frac{Q_i}{Q}$ . Теплота  $Q_i$  (кВт) эквивалентна

индикаторной работе за время  $\tau = 1\text{с}$  (индикаторной мощностью): 
$$N_i = \frac{Q_i}{\tau}. \quad (6-16)$$

Теплота  $Q$  (кВт) , затраченная на работу двигателя в течение 1с (затраченная мощность)  $Q = B \cdot (Q_n^p)$  , где  $B$  - расход топлива, кг/с;  $Q_n^p$  - низшая рабочая теплота сгорания топлива, кДж/кг. Подставляя значение  $Q_i$  и  $Q$  в равенство, получим:

$$\eta_i = \frac{N_i}{B \cdot (Q_n^p)}. \quad (6-17)$$

Удельный индикаторный расход топлива  $\left[\frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}\right]$  представляет собой отношение часового расхода топлива  $B_{\text{ч}}$  к индикаторной мощности  $N_i$  (кВт),

т.е.  $b_i = \frac{B_{\text{ч}}}{N_i} \frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$  или  $b_i = \frac{B_{\text{ч}}}{N_i} \cdot 10^3 \frac{\text{г}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$ . (6-18)

У дизельных двигателей индикаторный к.п.д. составляет 0,45-0,52. Удельный индикаторный расход топлива для дизельных двигателей равен (0,165-0,188)  $\frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$  [5]. Экономичность работы двигателя в целом определяют эффективным к.п.д.  $\eta_e$  и удельным эффективным расходом топлива  $b_e$ .

Эффективный к.п.д. оценивает степень использования теплоты топлива с учетом всех видов потерь, как тепловых так и механических и представляет собой отношение теплоты  $Q_e$ , эквивалентной полезной эффективной работе, ко всей затраченной теплоте  $B \cdot (Q_n^p)$ , т.е.

$$\eta_e = \frac{N_e}{B \cdot (Q_n^p)}. \quad (6-19)$$

Удельный эффективный расход топлива  $\left(\frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}\right)$  представляет собой отношение часового расхода топлива  $B_{\text{ч}}$  к эффективной мощности, т.е.  $b_e = \frac{B_{\text{ч}}}{N_e} \frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$ , или

$$b_e = \frac{B_{\text{ч}}}{N_e} \cdot 10^3 \frac{\text{г}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}. \quad (6-20)$$

Для дизельных двигателей эффективный к.п.д. составляет 0,36-0,43[5]. Значения удельного эффективного расхода топлива составляют для дизельных двигателей  $(0,195-0,235) \frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$  [5].

### **Выполнение работы**

#### **Задание 1. Изучить устройство стенда**

Одноцилиндровый четырехтактный дизельный двигатель воздушного охлаждения 1Ч 6.8 х 5.5 (UD 170) с измерительной аппаратурой и нагрузочным устройством установлен на фундаментной раме со свободным доступом к изучаемым узлам и агрегатам. Принципиальная схема лабораторного стенда представлена на рис. 6.6. Нагрузочное устройство гидравлического типа, включающее масляный бак емкостью 20 л, масляный насос шестеренчатого типа, механический дроссель и рукава высокого и низкого давления, имеет соединение с валом отбора мощности двигателя при помощи специального устройства измерения вращающего (крутящего) момента коленчатого вала (рис. 6.7). Получение характеристики холостого хода выполняется при полностью открытом дросселе нагрузочного устройства. Мощность, передаваемая валу насоса от двигателя, зависит от давления насоса и его производительности (объемной подачи). С уменьшением объемной подачи путём закрытия дросселя эта мощность растёт. Следовательно, должна расти и мощность, развиваемая двигателем. Полная мощность, передаваемая от вала двигателя валу насоса, является эффективной мощностью для двигателя:  $N_e = N_n = M \cdot 2\pi\omega$ . Измерение величины момента  $M$  и числа оборотов двигателя  $\omega$  позволяет найти его эффективную мощность. Величину эффективной мощности легко изменить, меняя подачу насоса с помощью рукоятки дросселя.

Панель управления стендом (рис. 6.8) смонтирована на мобильной раме со стороны маховика дизеля, что обеспечивает удобство управления и соответствует требованиям техники безо-

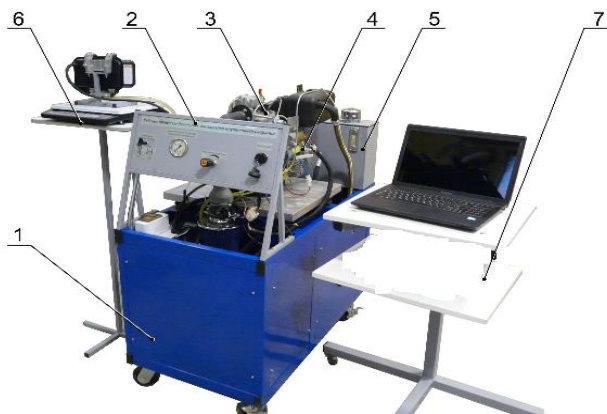


Рис.6.5. Общий вид стенда для изучения рабочих процессов дизельных двигателей: 1 – фундаментная рама; 2 – панель управления стендом; 3 поршневой двигатель; 4 – нагрузочное устройство; 5 – масляный бак; 6 – трубопроводы; 7 – стойка ЭВМ

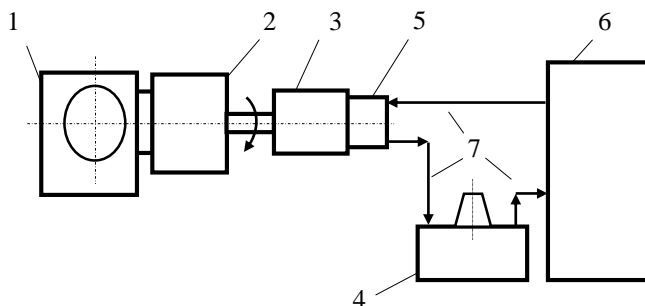


Рис.6.6. Принципиальная схема лабораторного стенда «Рабочие процессы дизельных двигателей».

1. Поршневой двигатель; 2. Измеритель крутящего момента; 3. Нагрузочный масляный насос; 4. Теплообменник; 5. Нагрузочный дроссель; 6. Масляный бак; 7. Трубопроводы низкого давления

пасности. В состав панели управления входит: модуль управления рейкой топливного насоса высокого давления (ТНВД) ди-

зеля, модуль управления гидравлическим дросселем и кнопка пуска. Манометр измеряет давление масла на выходе гидронасоса

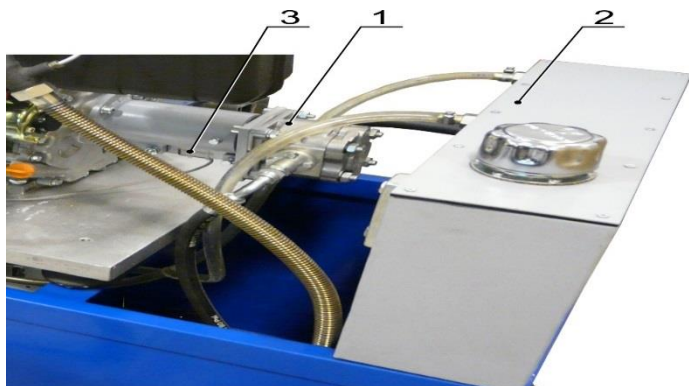


Рис.6.7. Нагрузочное устройство лабораторного стенда. 1. Масляный насос; 2 – Масляный бак; 3 – Датчик усилия



Рис.6.8. Панель управления стендом. 1 – Ключ пуска двигателя; 2 – Модуль управления топливной рейкой; 3 – Модуль управления гидравлическим дросселем; 4– Манометр давления масла нагружающего устройства

Измерение момента на валу двигателя осуществляется с помощью специальной тензометрической балки в режиме реаль-



ного времени и с выводом результатов на экран компьютера. Для измерения и контроля основных показателей двигателя в комплект поставки стенда входит измерительная аппаратура, позволяющая измерить 12 параметров работающего двигателя (см. табл. 6.1.)

Табл.6.1. Измерительная аппаратура лабораторной установки

№	Наименование	
1	Датчик давления рабочего тела в цилиндре двигателя	1 шт
2	Датчик разрежения во впускном трубопроводе	1 шт
3	Датчик давления отработавших газов	2 шт
4	Датчик температуры смазочного масла	1 шт
5	Датчик температуры отработавших газов	1 шт
6	Датчик температуры свежего заряда	1 шт
7	Датчик массового расхода воздуха во впускной системе	1 шт
8	Оптический измеритель температуры деталей двигателя	1 шт
9	Весовое устройство для измерения массового расхода топлива	1 шт
10	Датчик частоты вращения коленчатого вала.	1 шт
11	Датчик температуры масла нагрузочного устройства	1 шт
12	Датчик усилия в блоке измерения вращающего момента	1 шт

Стенд позволяет в режиме реального времени определять:

-частоту вращения коленчатого вала ( $\frac{\text{об}}{\text{мин}}$ );

-вращающий момент коленчатого вала ( $n \cdot m$ );

-эффективную мощность двигателя (кВт);

-часовой расход топлива ( $\frac{\text{кг}}{\text{час}}$ );

- удельный эффективный расход топлива ( $\frac{\Gamma}{\text{кВт} \cdot \text{час}}$ );
- температуру смазочного масла ( $^{\circ}\text{C}$ );
- температуру свежего заряда ( $^{\circ}\text{C}$ );
- температуру отработавших газов ( $^{\circ}\text{C}$ );
- разряжение во впускном трубопроводе (кПа);
- давление в выпускном трубопроводе до системы снижения шума (кПа);
- давление в выпускном трубопроводе после системы снижения шума (кПа);
- температуру масла нагрузочного устройства ( $^{\circ}\text{C}$ );
- массу топлива в измерительном бачке (кг).

Измерение расхода топлива осуществляется с помощью электронных весов (см.рис.6.10). Результаты выдаются на экран компьютера в виде удельного эффективного расхода топлива и массы топлива в измерительном бачке. Электронный блок, распо-



Рис. 6.9. Общий вид компьютерной системы регистрации данных



Рис.6.10. Бачок с топливом на электронных весах

ложенный в левой нижней части стенда (см. рис.6.11) играет важную роль в получении данных. Он осуществляет обработку данных всех датчиков и выводом их на экран компьютерной системы. Запуск двигателя осуществляется с помощью ключа зажигания стартером, подключённым к специальной аккумуляторной батарее.

Отвод отработавших газов осуществляется за пределы зала лаборатории при помощи специальных газоотводящих трубопроводов.



Рис.6.11. Системный электронный блок стенда

**До начала проведения эксперимента необходимо тщательно изучить меры предосторожности при работе со стендом.!!** Они приведены в Инструкции к стенду.

**ЗАПРЕЩАЕТСЯ:**

- запускать двигатель и проводить лабораторные работы в помещении, не предназначенном для испытаний двигателей (оборудование для отвода отработавших газов, система вентиляции и пожаротушения, водоснабжения и оказания первой медицинской помощи, а также вспомогательный инвентарь являются обязательными к установке);
- использовать топлива, смазочные материалы, охлаждающие и специальные жидкости, не предусмотренные техническими условиями на дизель 1Ч 6,8 × 5,5;
- подключать к двигателю дополнительное оборудование, вносить самостоятельные изменения в конструкцию двигателя и (или) его нагрузочного устройства без предварительного письменного согласия предприятия-изготовителя;
- эксплуатировать стенд при неисправной электрической проводке;
- проводить любые работы и мероприятия с использованием открытого огня (сварочные работы, курение, разведение костров и т.п.) в непосредственной близости от стенда;
- при работе двигателя располагаться или располагать посторонние предметы рядом с подвижными элементами стенда.

Табл. 6.2. Технические характеристики лабораторного стенда

№ п.п.	Наименование параметра	Значение параметра
	1.Номинальная мощность исследуемого двигателя, не более, кВт	2,8
	2.Номинальная частота вращения коленчатого вала, не более, мин <sup>-1</sup>	3600

3.Номинальный крутящий момент коленчатого вала исследуемого двигателя, не	8
4.Мощность двигателя при максимальном крутящем моменте, не более, кВт	2,5
5.Частота вращения коленчатого вала при максимальном крутящем моменте, не более, мин <sup>-1</sup>	3000
6.Максимальный крутящий момент коленчатого вала исследуемого двигателя, не более, Н·м	10
7.Максимальное давление в гидросистеме насоса-нагрузателя, не более, МПа	15
8.Максимальный расход нагрузочного масла насоса-нагрузателя, не более, л/мин	30
9.Емкость бака гидросистемы насоса-нагрузателя, не более, л	20
10. Диаметр цилиндра, мм -	70
11. Ход поршня, мм –	57
12. Рабочий объём цилиндра , см <sup>3</sup> -	219
13. Степень сжатия -	17
14. Радиус кривошипа, мм -	28
15. Длина шатуна, мм -	112

**Задание 2. Подготовить стенд к проведению испытаний и провести эксперимент**

А) Проверить наличие масла в двигателе и нагрузочном устройстве.

Б) Включить электронные весы в сеть, снять бачок с топливом и обнулить весы. При необходимости долить топлива в бачок (до  $\frac{3}{4}$  объёма).

В) Открыть полностью нагрузочный дроссель.

Г) Включить компьютер и электронный блок в сеть. запустить программное обеспечение (при помощи «ярлыка» на рабочем

столе). Подождать 2...3 мин для автоматической калибровки оборудования ( дождаться исчезновения символов «> <» на индикаторной панели ЭВМ). Обнулить показания всех датчиков (команда F2).

Примечание. Меню «Установки» содержит команду «Корректировка нуля», быстрый доступ к которой, обеспечивается клавишей F2. Использование данной команды является *обязательной* процедурой, выполняемой непосредственно перед проведением испытаний, после прогрева двигателя и нагрузочного устройства и выполнения автоматической калибровки датчиков. Перед выполнением «Корректировки нуля» двигатель необходимо остановить, а затем запустить вновь.

Меню «Данные» содержит следующие команды:

-«Добавить текущие показатели в буфер»;

-«Отменить последнее добавление в буфер»;

-«Добавить показатели в буфер вместе с результатами индицирования»;

-«Сохранить показатели в файл и очистить буфер ...».

Указанные команды используются для оперативной регистрации измеряемых параметров двигателя и формирования протокола испытаний

Д) Запустить двигатель с помощью ключа (стартера) и в режиме минимальной нагрузки (регулируется с помощью дросселя нагрузочного устройства) прогреть двигатель до температуры смазочного масла 55<sup>0</sup>-60<sup>0</sup>С. Остановить двигатель. Провести «корректировку нуля» и обнулить веса.

Е) Запустить двигатель, установить нагрузку двигателя примерно 30-40% от максимальной и снять показания с помощью команды «Добавить показатели в буфер вместе с результатами индицирования».

Ж) Установить мощность в пределах 50-70% от максимальной.

Выполнить операцию «Добавить показатели в буфер вместе с результатами индицирования». Остановить двигатель.

3) Показатели работы вместе с результатами индицирования из памяти компьютера перенести в табл. 6.3, 6.4 и 6.5.

Табл. 6.3. Показатели работы двигателя

N n/n	Наименование показателя	Номер опыта	
		1	2
1	Число оборотов коленвала $\omega, \frac{1}{\text{мин}}$		
2	Вращающий момент коленчатого вала M, Н·м		
3	Эффективная мощность двигателя N <sub>е</sub> , кВт		
4	Часовой расход топлива B <sub>ч</sub> , $\frac{\text{кг}}{\text{ч}}$		
5	Массовый расход воздуха, $\frac{\text{кг}}{\text{ч}}$		
6	Удельный эффективный расход топлива b <sub>е</sub> , $\frac{\text{кг}}{\text{кВт}\cdot\text{ч}}$		
7	Температура масла нагрудного устройства, °C		
8	Разряжение во впускном трубопроводе, кПа		
9	Давление в выпускном трубопроводе до системы снижения шума, кПа,		

10	Давление в выпускном трубопроводе после системы снижения шума, кПа		
11	Температура смазочного масла, °С		
12	Температура отработавших газов, °С		
13	Среднее эффективное давление $P_e$ , кПа		
14	Эффективный к.п.д. $\eta_e$ ,		
15	Индикаторная работа за цикл $L_i$ , Дж		
16	Индикаторная мощность $N_i$ , кВт		
17	Среднее индикаторное давление $P_i$ , кПа		
18	Индикаторный к.п.д. $\eta_i$ ,		
19	Мощность механических потерь $N_m$ , кВт		
20	Удельный индикаторный расход топлива $b_i$ , $\frac{\text{кг}}{\text{кВт}\cdot\text{ч}}$		
21	Среднее давление механических потерь $P_m$ , кПа		
22	Механический к.п.д. $\eta_m$ ,		

Таблица 6.4. Результаты индицирования (зависимость давления в цилиндре под поршнем от угла поворота коленвала за цикл)

Угол поворота, °	Давление, кПа	Угол поворота, °	Давление, кПа	Угол поворота, °	Давление, кПа




### Задание 3. Провести расчёты

Рассчитать значения различных характеристик дизельного двигателя, используя данные, приведенные в табл.6.3, 6.4 и 6.5, а так же формулы (6-2)-(6-20). Данные занести в соответствующие таблицы. Сделать выводы.

#### Пример проведения расчётов

**Опыт 1.** В эксперименте получены следующие значения величин: эффективная мощность двигателя  $N_e = 1,46$  кВт, частота вращения коленчатого вала  $\omega = 1510 \frac{1}{\text{мин}}$ , часовой расход топлива  $V_{\text{ч}} = 0,34 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$ , удельный эффективный расход топлива  $b_e = 231 \frac{\text{г}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$ , степень сжатия  $\varepsilon = 17$ , а так же значения функции  $P_i = f(\alpha)$  в интервале  $0^\circ$ - $720^\circ$  поворота коленвала, т.е за один цикл работы двигателя.

А) Среднее эффективное давление:

$$P_e = \frac{N_e \cdot \kappa}{2 \cdot V_h \cdot \omega \cdot z} = \frac{1,46 \cdot 10^3 \text{Вт} \cdot 4}{2 \cdot 219 \cdot 10^{-6} \text{м}^3 \cdot 25,2 \frac{1}{\text{с}} \cdot 1};$$

$$P_e = 5,29 \cdot 10^5 \text{Па} = 530 \text{кПа}.$$

Здесь  $V_h = V_{\text{ц}} = 219 \text{ см}^3$  - рабочий объём цилиндра, согласно паспорта на двигатель,  $\kappa = 4$  - число тактов.

Б) Эффективный к.п.д.:

$$\eta_e = \frac{N_e}{B \cdot (Q_H^p)} = \frac{1460 \text{Вт} \cdot 3600 \text{с}}{0,34 \text{кг} \cdot 43 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}} = 0,36.$$

$V_{\text{ч}}$  - часовой расход топлива;  $Q_H^p = 43 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}} = 43 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$  - удельная теплота сгорания бензина (низшая рабочая теплота сгорания).




Рассчитать индикаторные показатели работы двигателя, если значения индикаторной работы за цикл, рассчитанные в п.4 составляют  $L_i = 140$  Дж.

Д) Среднее индикаторное давление рабочего цикла (ф-ла 6-2):

$$P_i = \frac{L_i}{V_h} = \frac{140 \text{ Дж}}{219 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3} = 639 \text{ кПа.}$$

Е) Индикаторная мощность двигателя (ф-ла 6-4):

$$N_i = \frac{2}{\kappa} \cdot L_i \cdot \omega \cdot z \cdot 10^{-3} \text{ (кВт)} = \frac{2}{4} \cdot 140 \cdot 25,2 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \text{ (кВт)} = 1,760 \text{ кВт.}$$

Ж) Индикаторный к.п.д. (ф-ла 6-17):

$$\eta_i = \frac{N_i}{V_{ch} \cdot (Q_H^p)} = \frac{1760 \text{ Вт} \cdot 3600 \text{ с} \cdot \text{кг}}{0,34 \text{ кг} \cdot 43 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}} = 0,43.$$

З) Для идеального цикла бескомпрессорного дизеля термический к.п.д. определяется по формуле (6-1):

$$\eta_r = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{(\gamma-1)}} \cdot \frac{\chi \cdot \psi^\gamma - 1}{[(\chi-1) + \chi \cdot \gamma \cdot (\psi-1)]}.$$

При степени сжатия  $\varepsilon = 17$ , степени предварительного расширения  $\psi = 1,2$  и степени повышения давления  $\chi = 2$  значение термического к.п.д. бескомпрессорного дизеля  $\eta_r = 0,67$ . Оно примерно в 1,5 раза выше полученного в эксперименте значения индикаторного к.п.д.

И) Удельный индикаторный расход топлива  $b_i$  (ф-ла 6-18):

$$b_i = \frac{V_{ch}}{N_i} \cdot \frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}} \text{ или } b_i = \frac{V_{ch}}{N_i} \cdot 10^3 \frac{\text{г}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}.$$

$$b_i = \frac{0,34}{1,760} \frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}} = 0,19 \frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}.$$

Механические показатели рассчитываются по формулам (6-10), (6-11) и (-13):

К) Мощность механических потерь  $N_m$ , кВт:

$$N_M = N_i - N_e = 1,760 \text{ кВт} - 1,460 \text{ кВт} = 0,300 \text{ кВт}.$$

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	уг.п.к.вал		COS(A)		SIN(A)^2			σ		тек.объём	Давл.
2	1*6,28/360		COS(A2)		SIN(A2)^2			5-C2-(16-E2)^0,5		0,0137+0,1096*G2	1,272
3	2*6,28/360		COS(A3)		SIN(A3)^2			5-C3-(16-E3)^0,5		0,0137+0,1096*G3	1,531
4	3*6,28/360		COS(A4)		SIN(A4)^2			5-C5-(16-E4)^0,5		0,0137+0,1096*G4	1,272
5	4*6,28/360		COS(A5)		SIN(A5)^2			5-C5-(16-E5)^0,5		0,0137+0,1096*G5	1,445

Рис.6.9.Пример использования MS Excel для перевода значений  $P = f(\alpha)$   $P = f(V)$

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Тек.объём		Давл.					Эл.работа	
2	0,212886		1,013		A2-A3	(C2+C3)*10^5/2		E2*F2	
3	0,221598		1,272		A3-A4	(C3+C4)*10^5/2		E3*F3	
4	0,227855		1,531						

Рис.6.10. Пример использования MS Excel для нахождения индикаторной работы за цикл  $L_i$

Л) Среднее давление механических потерь:

$$P_m = P_i - P_e = 639 \text{ кПа} - 529 \text{ кПа} = 110 \text{ кПа}.$$

М) Механический к.п.д.:

$$\eta_m = \frac{N_e}{N_i} = \frac{N_i - N_M}{N_i} = 1 - \frac{N_M}{N_i} = 1 - \frac{0,300 \text{ кВт}}{1,760 \text{ кВт}} = 0,83.$$

Полученные данные занести в табл.6.3.

## **Выводы**

Сравнить данные, полученные в результате эксперимента, со справочными данными (можно использовать примерные данные из раздела «Краткие теоретические сведения»).

## **Контрольные вопросы**

1. Поясните, чем отличаются друг от друга идеальные циклы ДВС: Отто (горение топлива при постоянном объёме), Дизеля (горение топлива при постоянном давлении) и смешанный Тринклера (горение топлива при постоянном объёме и постоянном давлении).

2. Что такое индицирование двигателя? Каким образом его можно провести экспериментально?

3. Покажите с помощью формул, какая из мощностей ДВС-индикаторная или эффективная- больше?

4. Укажите сходства и различия впрыска топлива в дизельном двигателе и прямого впрыска в бензиновом двигателе.

5. Назовите основные части стенда и укажите их назначение.

6. Поясните методику определения индикаторной работы за цикл с помощью стенда.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей/Н.Б.Варгафтик.– М.:Издательский центр «Наука», 1972.- 720 с.
2. Крутов, В.И. Теплотехника / В.И. Крутов. – М.: Машиностроение, 2009. – 246 с.
- 3.Киреев Б.Н.Теплотехника: учебно-методическое пособие /Б.Н.Киреев.- Елабуга:Изд-во ЕГПУ, 2010.- 196 с.
- 4.Седёлкин В.М.Исследование работы воздушного компрессора: Методуказания по выполнению лабораторного практикума/В.М.Седёлкин и др..- Саратов: Издательство Саратовского ГТУ, -2010.- 15 с.
5. Автомобильные двигатели:учебник/М.Г.Шатров [и др]; под ред.М.Г.Шатрова. -М.: «Академия»,2010.- 464 с.
6. <http://yandex.ru/clck/jsreidir?> Цикл Миллера и его реализация в судовых двигателях.
- 7.<http://yandex.ru/clck/jsreidir?> Цикл Аткинсона.
- 8.<http://www.autoshcool.ru/>
- 9.[http://www.gdi.su/audi\\_vw.php](http://www.gdi.su/audi_vw.php)
- 10.<http://rus-auto.net/articles/p.101.html>
11. [www. dvs-vgsha.ru»pdf/posobie\\_ispitania/](http://www.dvs-vgsha.ru/pdf/posobie_ispitania/)
12. <http://www.sibadi.org/upload/praktikum.pdf> Стендовые испытания двигателей внутреннего сгорания: Лабораторный практикум для студентов механических специальностей / Сост.: А.Л.Иванов, А.С.Ненишев, И.И.Ширлин. Омск: Изд-во СибАДИ, 2008. - 36 с.

## Приложение 1.

Обозначения физических величин и их единицы измерения, используемые в пособии при расчётах.

Наименование, обозначение	Единица измерения в системе СИ	Используемая в работе
Модуль 1.		
Давление, P	Паскаль (Па)	кПа= 10 <sup>3</sup> Па
Давление атмосферное, P <sub>атм</sub>	Па	100 кПа
Работа, L	Джоуль (Дж)	кДж = 10 <sup>3</sup> Дж
Работа удельная, l	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}} = 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$
Изменение внутренней энергии, ΔU	Дж	кДж=10 <sup>3</sup> Дж
Изменение удельной внутренней энергии, Δu	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}} = 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$
Изменение энтропии, ΔS	$\frac{\text{Дж}}{\text{град}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{град}} = 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{град}}$
Изменение удельной энтропии, Δs	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг град}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг град}} = 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг град}}$
Молярная изохорная теплоёмкость, C <sub>v</sub> <sup>μ</sup>	$\frac{\text{Дж}}{\text{кмоль град}}$	$\frac{\text{Дж}}{\text{кмоль град}}$
Удельная изохорная теплоёмкость, c <sub>v</sub>	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг град}}$	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг град}}$
Показатель адиабаты, γ		
Показатель политропы, n		
Абсолютная температура, T	<sup>0</sup> К	<sup>0</sup> К
Температура Цельсия, t	<sup>0</sup> С	<sup>0</sup> С
Полный объём, V	м <sup>3</sup>	м <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> л = 10 <sup>6</sup> см <sup>3</sup>

Удельный объём, $v$	$\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$	$\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$
Плотность, $\rho$	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
Универсальная газовая постоянная, $R$	8314 $\frac{\text{Дж}}{\text{кмоль град.}}$	8314 $\frac{\text{Дж}}{\text{кмоль град.}}$
Приведенная газовая постоянная, $R_{\mu} = \frac{R}{\mu}$	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг град.}}$	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг град.}}$
Молярная масса, $\mu$	$\frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$	$\frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$
Теплота, $Q$	Дж	Дж
Удельная теплота, $q$	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$
Площадь, $F$	$\text{м}^2$	$\text{м}^2$
Усилие (сила), $G$	н	н
Модуль 2		
Число оборотов коленвала, $\omega$	$\frac{1}{\text{с}}$	$\frac{1}{\text{мин}} = \frac{1}{60 \text{ с}}$
Мощность, $N$	Вт	кВт = $10^3$ Вт
Показатель политропы, $n$		
Число цилиндров, $z$		
Число тактов, $k$		
Степень повышения давления, $\chi$		
Степень сжатия, $\varepsilon$		
Степень предварительного расширения, $\psi$		
Угол поворота коленвала, $\alpha$		
Время, $\tau$	с	
Кинематическая функция, $\sigma$		



Отношение радиуса кривошипа к длине шатуна, $\lambda$		
Показатель адиабаты, $\gamma$		
Коэффициент производительности, $\phi$		
Производительность, $J$	$\frac{мЗ}{с}$	$\frac{мЗ}{с} = 6 \cdot 10^4 \frac{л}{мин}$
КПД, $\eta$		

**Приложение 2.** Оценка погрешности измерений в лабораторном практикуме. Приближённые вычисления и округления результатов расчётов.

В лабораторных исследованиях следует оценивать погрешность измерения тех или иных величин с учётом погрешности (класса точности) приборов, используемых в данной установке. Теория оценки погрешности измерений в экспериментальных научных исследованиях достаточно сложна и громоздка и в учебном лабораторном практикуме, как правило, не используется.

В первых трёх лабораторных работах измерения проводятся с помощью стенда НТЦ-117. Для измерения давления и температуры используются тензодатчики с электронной системой индикации и термомпары. В паспорте стенда нет указаний на погрешности измерений используемых приборов, поэтому оценить погрешность получаемых результатов сложно.

Погрешность определения к.п.д. компрессорной установки в лабораторной работе № 4 можно оценить только ориентировочно. Индикаторная мощность, входящая в формулу для расчёта к.п.д. установки, определяется косвенно и оценка погрешности её определения достаточно условна. Единственным критерием правильности измерений и расчётов служит разумность получаемых в учебном лабораторном эксперименте цифр.

Округление рассчитанных величин следует проводить, следуя правилам приближённых вычислений, приведенных ниже.

Погрешность измерения рабочих характеристик двигателей в лабораторных работах №№ 5,6 не задана. Оценить правильность измерений и расчётов (индикаторного и эффективного к.п.д., удельного индикаторного и эффективного расхода топлива и др.) на используемых установках можно только сравнением полученных данных со справочными данными. Как правило, они должны лежать в определённом интервале значений для данного типа двигателя, приводимых в справочниках (см. [5]).

Округление рассчитанных величин следует делать, как и в первых четырёх работах, исходя из правил приближённых вычислений.

При произвольных расчётах необходимо пользоваться следующими правилами округления.

I. При сложении и вычитании приближенных чисел в результате следует сохранять *столько десятичных знаков*, сколько их в приближенном данном с *наименьшим числом десятичных знаков*.

Пример 1. Найти сумму приближенных чисел 127,42; 67,3; 0,12 и 3,03. Решение:  $127,42 + 67,3 + 0,12 + 3,03 = 197,87 = 197,9$ . В этом примере в данных число с наименьшим количеством десятичных знаков 67,3 — одна десятичная цифра 3.

Следовательно, в ответе также должна остаться одна десятичная цифра. Так как вторая значащая цифра 7 больше 5, округляем ответ с избытком, до 9.

II. При умножении и делении приближенных чисел в произведении надо сохранить *столько значащих цифр*, сколько их есть в данном числе с *наименьшим количеством значащих цифр*.

Пример 2. Умножить приближенные числа 3,4 и 12,32.

Решение:  $12,32 \cdot 3,4 = 41,888 = 42$ .

Здесь в данных число 3,4 имеет наименьшее количество значащих цифр — 2. И в ответе должно быть две значащих цифры. 1,888 округляем с избытком до 2.

Примечание: если данные числа меньше 1, например 0,025, то число значащих цифр считается от последнего 0, т.е. две знача-

щие цифры. Если данные имеют большое число нулей, например  $16 \cdot 10^5$ , то из значащих цифр берут 2 (число 16).

Пример 3. Площадь прямоугольника приближенно равна 7,6 кв. м, ширина -2,38 м. Чему равна ее длина?

Решение: длина прямоугольника равна частному от деления 7,6 на 2,38. Действие деления выполняют так:  $\frac{7,6}{2,38} = 3,19 = 3,2$ .

Частное от деления округляется с избытком.

III. При возведении приближенных чисел в степень (квадрат, куб и др.) в результате сохраняется столько значащих цифр, сколько их в основании.

Пример 4.  $(2,32)^2 = 5,38 \approx 5,4$ ; Пример 5.  $(0,83)^3 = 0,57178 \approx 0,57$ .

IV. В промежуточных результатах следует брать одной цифрой больше, чем рекомендуют предыдущие правила.

V. Если некоторые данные имеют больше десятичных знаков (при действиях первой ступени) или больше значащих цифр (при действиях II и III ступеней), чем другие, то их предварительно следует округлить, сохраняя лишь одну запасную цифру.

VI. Если данные можно брать с произвольной точностью, то для получения результата с k цифрами данные следует брать с таким числом цифр, которое дает согласно правилам (I – IV) k + 1 цифру в результате.

Пример 6. Найти значение  $x = \frac{(a-b) \cdot c}{a+b}$ , если  $a \approx 9,31$ ,  $b \approx 3,1$ ,

$c \approx 2,33$ . Знак  $\approx$  в дальнейшем использовать не будем.

Решение:

$$a - b = 9,31 - 3,1 = 6,21; (a - b) \cdot c = 6,21 \cdot 2,33 \approx 14,5;$$

$$a + b = 9,31 + 3,1 = 12,4; x = 14,5 : 12,4 \approx 1,1694 \approx 1,2.$$

Здесь  $k = 2$ ,  $k+1 = 3$ . Ответ.  $x = 1,2$ .

Сформулированные выше правила подсчета цифр имеют вероятностный смысл: они наиболее вероятны, хотя существуют примеры, не удовлетворяющие этим правилам. Поэтому вычисления способом подсчета цифр - самый грубый способ оценки погрешности результатов действий. Однако он очень прост и удобен, а точность таких вычислений вполне достаточна для большинства технических расчетов. Поэтому этот способ широко распространен в вычислительной практике.

Содержание	Стр.
<b>Введение.....</b>	3
<b>Модуль 1. Термодинамика.....</b>	5
<b>Описание стенда НТЦ-117.....</b>	5
<b>Лабораторная работа № 1. Изучение изохорного процесса</b>	10
Краткие теоретические сведения.....	10
Выполнение работы.....	12
Контрольные вопросы.....	17
<b>Лабораторная работа № 2.Изучение изобарного процесса</b>	17
Краткие теоретические сведения.....	17
Выполнение работы.....	19
Контрольные вопросы.....	24
<b>Лабораторная работа №3 Изучение адиабатного процесса.....</b>	24
Краткие теоретические сведения.....	24
Выполнение работы.....	26
Контрольные вопросы.....	29
<b>Модуль 2. Анализ термодинамических циклов тепловых двигателей и машин. Экспериментальное определение их рабочих характеристик. ....</b>	30
<b>Лабораторная работа №4. Изучение работы одноступенчатого поршневого компрессора.....</b>	30
Краткие теоретические сведения.....	30
Выполнение работы.....	40
Контрольные вопросы.....	46
<b>Лабораторная работа № 5. Изучение устройства и определение рабочих характеристик бензинового двигателя ..</b>	46
Краткие теоретические сведения. ....	46
Выполнение работы.....	57
Контрольные вопросы.....	74
<b>Лабораторная работа №6. Изучение устройства и определение рабочих характеристик дизельного двигателя.....</b>	74
Краткие теоретические сведения. ....	74
Выполнение работы.....	86
Контрольные вопросы .....	101
<b>Список использованных источников.....</b>	102
<b>Приложение 1. Обозначения физических величин и их единицы измерения, используемые в пособии при расчётах .....</b>	103
<b>Приложение 2. Оценка погрешности измерений в лабораторном практикуме. Приближённые вычисления и округления результатов расчётов .....</b>	105

Учебное пособие

**Киреев Борис Николаевич**

**Лабораторный практикум по термодинамике  
и рабочим процессам ДВС**

В авторской редакции. Корректурa автора.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Формат 60x84 1/16. Усл. печ. л. 6,75

Тираж 300 экз.

Издательство ЕИ К(П)ФУ в г. Елабуга  
423600, РТ, г. Елабуга, ул. Казанская, 89.





