

# **ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ И НАГНЕТАТЕЛИ**

**ИЗДАТЕЛЬСТВО ТГТУ**

# ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ И НАГНЕТАТЕЛИ

Методические указания к лабораторным работам  
для студентов третьего курса специальности 140106  
«Энергообеспечение предприятий»



---

Тамбов  
Издательство ТГТУ  
2006

УДК 621.1.016  
ББК 311я73-5  
Л992

Утверждено Редакционно-издательским советом университета

Рецензенты:

Кандидат технических наук, доцент ТГТУ  
*Ю.В. Кулешиов*

Кандидат технических наук, доцент ТГТУ  
*В.А. Набатов*

Составители:

*В.И. Ляшков, В.А. Русин*

Л992 Тепловые двигатели и нагнетатели : метод. указания / сост. : В.И. Ляшков, В.А. Русин. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2006. – 16 с. – 200 экз.

Приведены методические указания и порядок выполнения лабораторных работ, включая подробное описание экспериментальной установки, методики проведения экспериментов и обработки опытных данных. Дается список рекомендуемой литературы.

Предназначены для студентов специальности 140106 – Энергообеспечение предприятий.

УДК 621.1.016(076)

ББК 311я73-5

© ГОУ ВПО «Тамбовский государственный  
технический университет» (ТГТУ), 2006

Учебное издание

# ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ И НАГНЕТАТЕЛИ

Методические указания

Составители: ЛЯШКОВ Василий Игнатьевич,  
РУСИН Владимир Александрович

Редактор Т.М. Глинкина  
Инженер по компьютерному макетированию Т.А. Сынкova

Подписано в печать 28.02.2006.

Формат 60 × 84 / 16. 0,93 усл. печ. л.

Тираж 200 экз. Заказ № 889

Издательско-полиграфический центр  
Тамбовского государственного технического университета  
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ЦЕНТРА ТЯЖЕСТИ И РАСПРЕДЕЛЕННЫХ МАСС ШАТУНА

**Цель работы:** определить расчетным, а затем и опытным путем положение центра тяжести шатуна. Определить величины условных распределенных масс шатуна (массы, отнесенной к шатунной шейке, и массы, отнесенной к поршневому пальцу).

### Основы теории

При проектировании поршневых машин (поршневого двигателя внутреннего сгорания или поршневого компрессора) для расчета действующих там сил инерции необходимо знать массу шатуна, положение его центра тяжести, а также условные массы, как бы дополнительно присоединяемые к поршню и к шатунной шейке коленчатого вала. На рис. 1 приведена схема кривошипно-шатунного механизма с условным распределением масс движущихся деталей: массы поршня с поршневым пальцем  $m_p$ , массы шатуна  $m_{ш}$  и условной массы  $m_{шш}$ , сосредоточенной на оси шатунной шейки и эквивалентной (по величине центробежных сил) массе шатунной шейки и массам двух щек кривошипа.

При работе механизма поршень совершает возвратно-поступательное движение вдоль оси цилиндра, шатунная шейка вращается вокруг оси коленчатого вала, а шатун совершает плоскопараллельное движение, при котором верхняя головка шатуна движется вместе с поршнем, а нижняя головка движется вместе с шатунной шейкой. И хотя скорости и ускорения перемещения шатуна определяются достаточно просто, точный расчет действующих на него сил инерции весьма громоздок и затруднителен. Поэтому в инженерных расчетах [1, 2] плоскопараллельное движение шатуна принято заменять возвратно-поступательным движением одной его части с массой  $m_{шп}$ , условно сосредоточенной в той же точке, где сосредоточена масса поршня. Принимается также, что другая часть шатуна массой  $m_{шшш}$  совершает вращательное движение вместе с шатунной шейкой и сосредоточена на оси этой шейки. Такая замена упрощает динамический анализ и не вносит заметных погрешностей в расчеты.

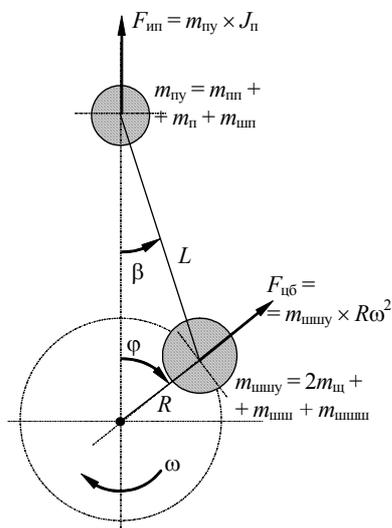
На рис. 2 приведена условная двухмассовая расчетная схема кривошипно-шатунного механизма с изображением действующих в нем сил инерции и приведенных масс.

Массу шатуна и положение его центра тяжести на стадии проектирования машины определяют расчетным путем, используя приближенные эмпирические формулы [1]:

$$m_{ш} = 4kD^2;$$

$$L_{цт} = 0,2L_{ш} \frac{(0,001n)^2 + 2}{(0,001n)^2 + 1},$$

где  $k$  – опытный коэффициент (для шатунов со стержнем круглого сечения обычно принимается  $k = 35 \text{ кг/м}^2$ , для шатунов с двутавровым стержнем  $k = 30 \text{ кг/м}^2$ );  $D$  – диаметр цилиндра, м;  $L_{ш}$  – длина шатуна по межцентровому расстоянию, м;  $n$  – номинальное число оборотов двигателя в минуту.



**Рис. 2. Схема кривошипно-шатунного механизма с действующими силами инерции и распределенными массами**

Более точные расчеты выполняют, представляя эту достаточно сложную по геометрии деталь как бы состоящей из двух цилиндров и соединяющего их стержня прямоугольного (или более сложного, например, двутаврового сечения), как это представлено на рис. 3. На следующем рисунке (рис. 4) приведена расчетная схема, позволяющая легко определить положение центра тяжести шатуна. На рис. 5 показано условное распределение масс шатуна, которое используется при динамических расчетах шатунно-кривошипного механизма.

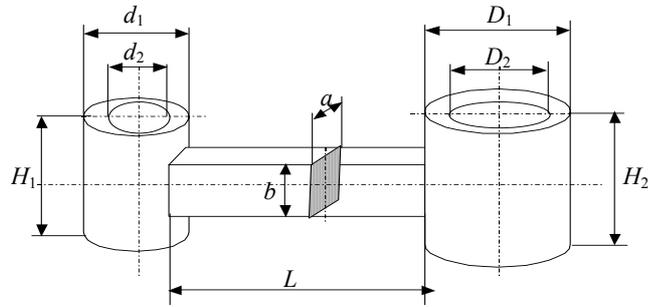


Рис. 3. Условная схема шатуна ДВС или поршневого компрессора

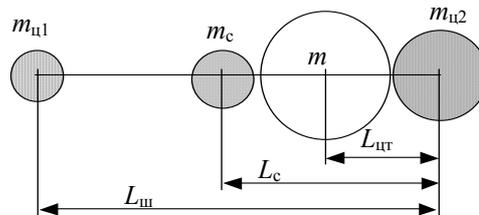


Рис. 4. Схема распределения масс шатуна

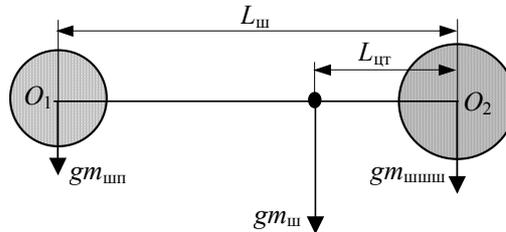


Рис. 5. Схема условного распределения масс шатуна и действующих сил

Ниже приведены простые соотношения, позволяющие рассчитать массы каждой из выделенных частей шатуна, полную массу шатуна и расстояние от оси нижней головки до центра тяжести. Здесь  $\rho$  – плотность материала (для сталей обычно принимается  $\rho = 7860 \text{ кг/м}^3$ ), а все остальные обозначения понятны по рис. 3 – 5.

$$L_{ш} = d_1 / 2 + L + D_1 / 2; \quad L_c = D_1 / 2 + L / 2;$$

$$m_{ц1} = \frac{\pi(d_1^2 - d_2^2)}{4} H_1 \rho;$$

$$m_{ц2} = \frac{\pi(D_1^2 - D_2^2)}{4} H_2 \rho;$$

$$m_c = a \times b \times L \times \rho; \quad m_{ш} = m_{ц1} + m_c + m_{ц2};$$

$$L_{цт} = \frac{m_c L_c + m_{ц1} L_{ш}}{m_{ш}}.$$

Применяя теорему Вариньона о моменте равнодействующей относительно осей  $O_1$  и  $O_2$  (см. рис. 5):

$$M_o(m_{ш}g) = M_o(m_{шп}g) + M_o(m_{шшш}g),$$

получаем

$$m_{шшш} = m_{ш}(L_{ш} - L_{цт}) / L_{ш}; \quad m_{шп} = m_{ш}L_{цт} / L_{ш}.$$

На стадии испытаний и доводки машины, когда имеются изготовленные детали, массу шатуна определяют взвешиванием, а положение центра тяжести – применением особых приемов взвешивания, которые реализуются на одной из простых экспериментальных установок, схемы которых приведены ниже.

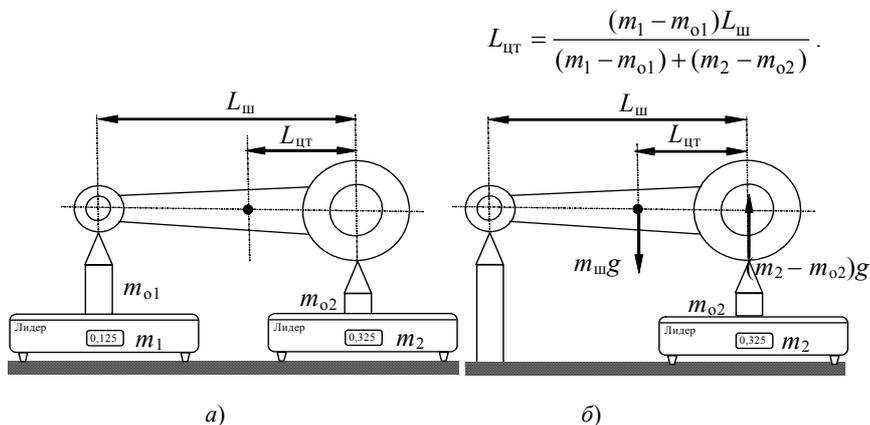
#### Экспериментальная установка и методика экспериментов

Возможные схемы экспериментальной установки приведены на рис. 6. Как это видно из рисунка, такая установка может состоять из двух весов и двух призматических опор или из одних весов с такими же опорами.

В первом случае масса шатуна  $m_{ш}$  определяется суммой масс  $(m_1 - m_01) + (m_2 - m_02)$ , где  $m_1$  и  $m_2$  – показания первых и вторых весов, а  $m_01$  и  $m_02$  – массы опор, каждая из которых взвешивается предварительно. Тогда из равенства моментов относительно центра тяжести

$$g(m_1 - m_01)(L_{ш} - L_{цт}) = g(m_2 - m_02)L_{цт}$$

находим



**Рис. 6. Варианты организации эксперимента:**  
*a* – с двумя весами и опорами; *b* – с одними весами и опорами

При варианте с одними весами сначала взвешивают весь шатун, определяя его массу  $m_{ш}$ . Далее определяют взвешиванием  $m_2$ . Тогда, записав равенство моментов относительно оси верхней головки шатуна

$$(m_2 - m_{o2}) g L_{ш} = m_{ш} g (L_{ш} - L_{цт}),$$

находим

$$L_{цт} = \left[ 1 - \frac{(m_2 - m_{o2})}{m_{ш}} \right] L_{ш}.$$

Для того, чтобы убедиться в правильности методики и получить более достоверные данные, обычно проводят другое взвешивание, укладывая шатун на жесткую опору нижней головкой, а верхняя головка подвергается взвешиванию. Тогда расчетная формула получается другой:

$$L_{цт} = \frac{(m_1 - m_{o2}) L_{ш}}{m_{ш}}.$$

Чтобы определить расчетным путем величины  $m_{ш}$  и  $L_{цт}$ , проводим измерения основных геометрических размеров исследуемого шатуна, корректируя полученные значения с учетом отличия реальной формы элементов конструкции от упрощенной, принятой нами для приближенного расчета. Для опытного определения  $m_{ш}$  и  $L_{цт}$  проводим необходимые взвешивания по схеме второго варианта.

### Обработка опытных данных

Исходные данные по измерениям и по взвешиванию, а также результаты расчетов удобно представлять в табличной форме (табл. 1, 2).

#### 1. Исходные данные и результаты теоретического определения $m_{ш}$ и $L_{цт}$

Результаты измерений									Результаты расчетов			
$d1$ , м	$d2$ , м	$H1$ , м	$D1$ , м	$D2$ , м	$H2$ , м	$a$ , м	$b$ , м	$L$ , м	$m_{ш}$ , кг	$L_{цт}$ , м	$m_{шп}$ , кг	$m_{шшш}$ , кг
Двигатель ЗИЛ-130: $D = 0,1$ м, $n = 2500$ об/мин												

#### 2. Исходные данные и результаты экспериментального определения $m_{ш}$ и $L_{цт}$

Исходные данные					Результаты расчетов		
№ опытов	$m_{ш}$ , кг	$m_{o2}$ , кг	$m_1$ , кг	$m_2$ , кг	$L_{цт}$ , м	$m_{шп}$ , кг	$m_{шшш}$ , кг
1			не изм.				
2				не изм.			
Невязка результатов, %							

После расчета значений  $L_{цт}$ ,  $m_{шп}$  и  $m_{шшш}$  находят невязку результатов расчетного и опытного определения массы шатуна, а также невязку результатов опытного определения величины  $L_{цт}$  по формулам:

$$\delta_{m_{расч}} = \frac{(m_{расч} - m_{взвеш})}{m_{взвеш}} 100;$$

$$\delta_{\text{мопытн}} = \frac{(m_1 - m_{o2}) + (m_2 - m_{o2})}{m_{\text{шт}}} 100;$$

$$\delta_{L_{\text{цт}}} = \frac{L_{\text{цт1}} - L_{\text{цт2}}}{(L_{\text{цт1}} + L_{\text{цт2}}) / 2} 100.$$

Отчет о работе должен содержать краткое изложение цели работы, основ теории, таблицы исходных данных, обработку опытных данных, а также анализ и выводы по результатам работы.

#### Список литературы

1. Дизели : справочное пособие конструктора / под ред. В.А. Ваншейдта. – М., 1957. – 317 с.
2. Двигатели внутреннего сгорания / под ред. А.С. Орлина. – М., 1962. – Т. II. – 242 с.

#### Лабораторная работа 2

### ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРШНЕВОГО КОМПРЕССОРА

**Цель работы:** опытным путем определить основные характеристики поршневого компрессора, сделать выводы по результатам проведенного исследования.

#### Основы теории

При проектировании и эксплуатации поршневых компрессоров необходимо знать технико-экономические показатели этих машин, включая зависимости технико-экономических характеристик от основных режимных факторов. Эти зависимости и принято называть характеристиками компрессора. Характеристики компрессора определяются экспериментально на специально оборудованных стендах, обеспечивающих реализацию различных режимов работы и измерения основных параметров, таких как подводимая мощность, объемная производительность, число циклов в единицу времени и др.

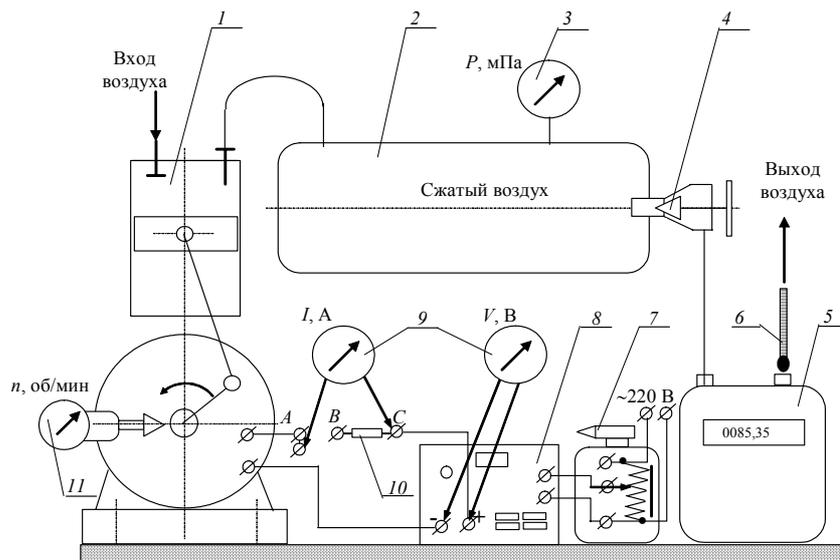
Скоростная характеристика компрессора показывает, как изменяется объемная производительность  $G$  при изменении числа оборотов  $n$  приводного вала при постоянном противодавлении  $p_{\text{вых}}$  на выходе.

Нагрузочными характеристиками называют зависимость объемной производительности  $G$  от противодавления  $p_{\text{вых}}$  при постоянном числе оборотов  $n$ , а также зависимость подводимой мощности  $N$ , зависимость объемного КПД  $\eta_{\text{об}}$  от противодавления  $p_{\text{вых}}$  при тех же режимных условиях.

Сведения, полученные при экспериментальном изучении скоростной и нагрузочных характеристик, позволяют построить обобщенную характеристику, которая строится в виде зависимости  $p_{\text{вых}} = f(G)$ , на которой наносится сетка кривых с параметром  $n$ . Такая обобщенная характеристика позволяет легко определять число оборотов  $n$  коленчатого вала компрессора, при котором будет обеспечиваться требуемая производительность  $G$  при заданном противодавлении  $p_{\text{вых}}$ .

#### Экспериментальная установка и методика экспериментов

Детальная схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Сжатый в цилиндре малогабаритного компрессора 1 воздух направляется в ресивер 2, служащий для сглаживания импульсов давления, возникающих при работе поршневого компрессора. Противодавление  $p_{\text{вых}}$  на выходе из компрессора измеряется манометром 3. На выходе из ресивера установлен конический дросселирующий ventиль 4, степень открытия которого можно изменять, вращая маховик ventиля. После дросселирования до давления, близкого к атмосферному, воздух направляется в газовый счетчик 5, позволяющий фиксировать количество прошедшего газа с точностью до 1 литра. Из счетчика воздух вытекает в атмосферу, где на выходе из счетчика термометром 6 измеряется его температура.



**Рис. 1. Схема экспериментальной установки:**

- 1 – компрессор; 2 – ресивер; 3 – манометр; 4 – дросселирующий ventиль;  
5 – счетчик газовый; 6 – термометр; 7 – ЛАТР; 8 – блок питания;  
9 – мультиметры; 10 – шунт; 11 – тахометр ручной

Привод компрессора осуществляется встроенным электродвигателем постоянного тока. Для питания этого электродвигателя служит специальный блок питания 8 с переключателями выходного напряжения. Скорость вращения вала компрессора измеряется с помощью ручного тахометра центробежного типа 11, а напряжение  $U$  и ток  $i$ , необходимые для рас-

чета потребляемой электрической мощности, измеряются мультиметрами 9. Для измерения  $U$  щупы одного прибора присоединяются к выходным клеммам блока питания 8, а для измерения тока в сети, если он не превышает 10 А, щупы другого мультиметра устанавливают в разрыв цепи в клеммы  $A$  и  $C$ . Если же при повышении напряжения питания и противодействия величина тока  $i$  приближается к пределу измерения мультиметра ( $i_{\max} = 10 \text{ А}$ ), то цепь замыкается в точках  $A$  и  $B$  специальной перемычкой, а с помощью мультиметра измеряют падение напряжения на калиброванном шунте 10, присоединяя щупы к клеммам  $A$  и  $C$ . Величину тока тогда определяют по закону Ома:

$$I = \Delta U_{A-C} / R_{\text{ш}},$$

где  $R_{\text{ш}} = 10,32 \text{ Ом}$ .

Чтобы плавно изменять число оборотов электродвигателя, в электрическую сеть включен лабораторный автотрансформатор 7, с помощью которого можно на 15 – 20 % уменьшить напряжение, подводимое к блоку питания.

Для проведения опытов необходимо вставить вилку ЛАТРа в розетку 220 В и нажать кнопку «Вкл» на передней панели блока питания. При этом загорается сигнальная лампочка.

При снятии скоростной характеристики клавишами, размещенными в правой части панели управления, устанавливаем минимально возможное напряжение питания (все клавиши нажаты на свои левые части). Переключатель рода измерений мультиметра устанавливаем в положение для измерения тока 10 А и щупы прибора вставляем в клеммы  $A$  и  $C$ . Далее включаем приводной электродвигатель выключателем, расположенным на передней стороне компрессора. При этом амперметр-индикатор на передней панели блока питания, а также мультиметр будут показывать наличие тока в цепи, а компрессор начнет закачивать воздух в ресивер.

Перекрывая выходное сечение с помощью конусного дросселирующего вентиля 4, устанавливаем в ресивере некоторое давление (например, 0,1 МПа). После наступления установившегося режима проводим измерения расхода  $G$  (а точнее – величин  $\Delta V$  и  $\tau$ ), падения напряжения  $U$  и тока  $i$ . Для определения расхода замеряем по часам или секундомеру время, в течение которого через газовый счетчик пройдет определенное количество (например, 100 л) воздуха. Результаты замеров заносятся в таблицу исходных опытных данных (табл. 1). Туда же заносим впоследствии и результаты расчета основных характеристик каждого режима.

Далее увеличиваем напряжение питания электродвигателя, нажимая соответствующую клавишу на передней панели блока питания. Естественно, что давление в ресивере начнет увеличиваться. Приоткрываем дроссельный клапан так, чтобы давление оставалось таким же, как при первом измерении. Дождавшись установившегося режима, проводим измерения  $U$ ,  $i$ ,  $\Delta V$  и  $\tau$ , фиксируем в таблице показания приборов. Аналогично проводим измерения еще для двух режимов.

Последующие серии опытов проводим при более высоких противодействиях в ресивере (например, при 0,2, 0,3 и 0,4 МПа). По результатам проведенных измерений строим скоростные характеристики при разных противодействиях (в качестве примера см. рис. 2).

Для построения нагрузочных характеристик опыты тоже проводят отдельными сериями, причем в каждой из серий меняют лишь противодействие  $p_{\text{вых}}$ . При этом изменением напряжения питания  $U$  и дополнительно небольшим уменьшением напряжения питания ЛАТРа добиваются, чтобы в каждом опыте число оборотов привода компрессора  $n$  было одно и то же. Обычно проводится 3 – 4 серии опытов, например, при противодействиях 0,1, 0,2, 0,3 и 0,4 МПа.

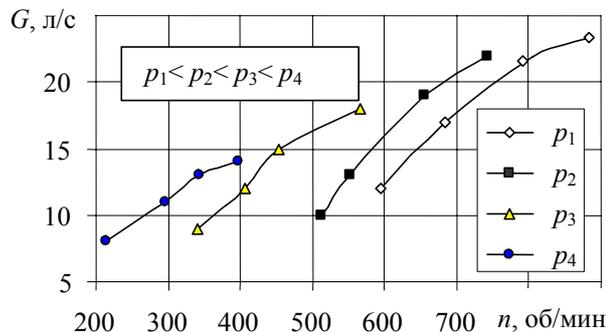


Рис. 2. Скоростные характеристики

Результаты измерений и соответствующих расчетов заносятся в табл. 2, и по ним строятся зависимости  $G = f(p_{\text{вых}})$  с параметром  $n$  (рис. 3, например),  $\eta_{\text{об}} = f(p_{\text{вых}})$ ,  $N_{\text{эл}} = f(p_{\text{вых}})$ .

Обобщенные характеристики строят по-другому: в качестве аргумента (по оси абсцисс) принимается расход газа  $G$ , а в качестве функций (по оси ординат) – противодействие  $p_{\text{вых}}$ , электрическая мощность  $N_{\text{эл}}$  и объемный КПД  $\eta_{\text{об}}$  (рис. 4, где зависимости  $\eta_{\text{об}} = f(G)$  и  $N_{\text{эл}} = f(G)$  приведены только для одной из скоростей  $n$ ).



3									
4									

3. Для каждого опыта рассчитывается теоретическая подача компрессора  $G_{\text{теор}}$  по формуле:

$$G_{\text{теор}} = \frac{\pi D^2 S n}{4 \cdot 60}$$

где  $D$  – диаметр цилиндра,  $D = 0,025$  м;  $S$  – рабочий ход поршня,  $S = 0,05$  м.

4. Для каждого опыта рассчитывается величина объемного КПД  $\eta_{\text{об}}$  компрессора:

$$\eta_{\text{об}} = G / G_{\text{теор}}$$

Все приведенные расчеты удобно выполнять автоматически, заполняя исходными данными электронные таблицы пакета MS Excel. Там же будут автоматически построены графики соответствующих характеристик. Необходимая для этого программа «Характеристики поршневого компрессора» разработана в 2005 г. студентом группы ЭП31 Я.М. Овчинниковым и находится на дисках ПК компьютерного класса кафедры.

**2. Результаты измерений и расчетов  
при исследовании нагрузочных характеристик**

Режим	Результаты измерений						Результаты расчетов		
	$p_{\text{вых}}$ , МПа	$U$ , В	$I$ , А	$n$ , об/мин	$\Delta V$ , л	$\tau$ , с	$G$ , м <sup>3</sup> /с	$N_{\text{эл}}$ , Вт	$\eta_{\text{об}}$ , 1/1
1	0,12	9,8	6,95	1120	100	274	0,000365	68,1	0,797
				1120					
				1120					
				1120					
2									
3									
4									

Все этапы лабораторной работы должны быть лаконично отражены в отчете, написанном разборчивым почерком и содержащем необходимые рисунки, графики и формулы. Заканчиваться отчет должен анализом полученных результатов. Отчет составляется каждым студентом и представляется преподавателю при защите работы. Без защиты работы студент не может быть допущен к экзамену или положительно аттестован на зачете.

**Список литературы**

1. Черкасский, В.М. Насосы, вентиляторы, компрессоры / В.М. Черкасский. – М., 1977. – 479 с.
2. Френкель, М.И. Поршневые компрессоры / М.И. Френкель. – М., 1969. – 432 с.