

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Северский технологический институт – филиал
федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального
образования
**«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(СТИ НИЯУ МИФИ)»**

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой МАХАП

канд. техн. наук И.Ю. Русаков

«29» октября 2013 г.

Л.Ф. Зарипова

**ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ПОЛИТРОПНЫХ ПРОЦЕССОВ**

Практическое руководство

Северск 2013

УДК 536.35(075)

ББК 31.31

3-347

Зарипова Л.Ф.

3-347 Численное и экспериментальное исследование политропных процессов: практическое руководство/ Л.Ф. Зарипова. – Северск: Изд-во СТИ НИЯУ МИФИ, 2013. – 17 с.

В руководстве приведены теоретические основы политропных процессов, реализуемых в тепловых машинах и установках, а также описание лабораторной установки, методика проведения лабораторной работы, порядок ее выполнения и обработки экспериментальных данных, а также требования к отчету

Руководство предназначено для студентов СТИ НИЯУ МИФИ специальностей 240801 – «Машины и аппараты химических производств» и 240601 – «Химические материалы современной энергетики» при выполнении расчетно-практических работ по курсам «Техническая термодинамика и теплотехника», «Процессы и аппараты химической технологии».

Одобрено на заседании методического семинара кафедры МАХП (протокол № 7 от 3.07.2013 г.).

Печатается в соответствии с планом выпуска учебно-методической литературы на 2013 г., утвержденным ученым Советом СТИ НИЯУ МИФИ.

Рег. № 29/13 от 30.10.2013 г.

Рецензент:

д-р техн. наук, профессор СТИ НИЯУ МИФИ
В.Л. Софронов

Редактор

М. В. Ворожейкина

Подписано к печати _____ Формат 60x84/32.

Гарнитура Times New Roman. Бумага писчая №2.

Плоская печать. Усл. печ. л. 0,49. Уч. изд. л. 0,89.

Тираж 30 экз.

Заказ _____

Отпечатано в ИПО СТИ НИЯУ МИФИ

636036, Томская обл., г. Северск,
пр. Коммунистический, 65.

Содержание

	Введение.....	4
1	Цель работы.....	5
2	Теоретические основы.....	5
3	Описание лабораторной установки.....	9
4	Методика выполнения работы.....	11
5	Порядок выполнения работы.....	12
6	Обработка полученных результатов.....	14
7	Содержание отчета.....	16
8	Контрольные вопросы.....	16
9	Основные опасные моменты.....	17
	Литература.....	17

Введение

Исследование термодинамических процессов идеальных газов ставит своей целью разработать методы расчета параметров состояния системы в процессе, а также методы определения теплообмена q системы с внешней средой и количества работы l , совершаемой рабочим телом. В этих целях на основе уравнения первого закона термодинамики, записанного для условий рассматриваемого процесса, определяется уравнение самого процесса, характеризующее изменение состояния рабочего тела. На основе уравнения процесса можно получить функциональные зависимости $p = f(v)$; $s = f(T)$ и т.д. и выявить особенности расходования подведенной к рабочему телу теплоты на изменение внутренней энергии и совершение рабочим телом внешней работы.

Объектами исследования являются упругие жидкости, обладающие высокими коэффициентами температурного расширения, это газы и пары, используемые в качестве рабочих тел в тепловых машинах.

Обычно рассматриваются процессы обратимые и в первую очередь для идеального газа.

При исследовании термодинамических процессов требуется:

- вывести уравнение процесса вида $f(p, v) = 0$ на основании условий протекания процесса и дать график процесса в системе координат $p-v$;
- установить связь между термодинамическими параметрами;
- определить изменение внутренней энергии идеального газа;
- определить величину внешней механической работы, совершаемой газом при расширении, или работы, совершаемой внешней средой над газом при его сжатии;
- найти количество тепла, сообщаемое газу или отнимаемое от него в процессе.

Параллельно с аналитическим исследованием в термодинамике проводится исследование в диаграммах, в первую очередь в диаграммах $p-v$ и $T-s$. Анализ диаграмм позволяет установить происходит ли в данном процессе расширения и сжатия подвод или отвод тепла и как изменяется внутренняя энергия (т.е. увеличивается или уменьшается температура) в рассматриваемом процессе.

В руководстве приведены теоретические основы политропных процессов, реализуемых в тепловых машинах и установках, а также описание лабораторной установки, методика проведения лабораторной работы и обработки экспериментальных данных.

Данная лабораторная работа позволяет закрепить теоретический материал, рассмотренный в дисциплинах «Техническая термодинамика и теплотехника», «Процессы и аппараты химической технологии».

1 Цель работы

- 1.1 Изучить и провести термодинамический анализ политропных процессов.
- 1.2 Определить показатель политропы.
- 1.3 Определить изменение внутренней энергии и энтропии.
- 1.4 Рассчитать количество тепла, отведенного от рабочего тела.
- 1.5 Рассчитать количество совершенной работы.
- 1.6 Построить p - v и T - s диаграммы процесса.

2 Теоретические основы

Любое изменение параметров теплового состояния тел называется термодинамическим процессом. Как правило, в каждом процессе меняются все три параметра состояния тел: p , v , T – давление, удельный объем и абсолютная температура. Среди термодинамических процессов идеальных газов выделяют политропные процессы, большая часть которых реализуется в тепловых машинах и установках, так как они с достаточной точностью могут считаться политропными, подчиняющимися уравнению

$$p v^n = \text{const}, \quad (1)$$

где n – показатель политропы, который может принимать любое постоянное для процесса значение от $-\infty$ до $+\infty$.

Из этого следует, что политропным процессом является термодинамический процесс, во время которого удельная теплоёмкость c газа остаётся неизменной. Предельными частными явлениями политропного процесса являются изотермический, изобарный, изохорный и адиабатный процессы. Для них:

1) при $n = 1$ уравнение принимает вид $p v^1 = \text{const}$, так как $p v = R T$, тогда $T = \text{const}$, т. е. в изотермическом процессе p и v обратно пропорциональны друг другу:

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{p_1}{p_2} \text{ – закон Бойля-Мариотта;}$$

2) при $n = 0$ уравнение принимает вид $p v^0 = \text{const}$, т.е. $p = \text{const}$, тогда $v = \frac{R T}{p}$, т.е. в изобарном процессе объем прямо пропорционален температуре:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2} \text{ – закон Гей-Люссака;}$$

3) при $n = \infty$ уравнение принимает вид $p v^\infty = \text{const}$, т.е. $v = \text{const}$, тогда при изохорном процессе:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1} - \text{закон Шарля};$$

4) при $n = k$ уравнение принимает вид $p v^k = \text{const}$, это уравнение адиабатического процесса, протекающего без теплообмена с окружающей средой, здесь k – показатель адиабаты, равный:

$$k = \frac{c_p}{c_v},$$

где c_p – изобарная теплоемкость (теплоемкость при постоянном давлении);
 c_v – изохорная теплоемкость (теплоемкость при постоянном объеме).

Теплоемкость является одной из основной теплофизических характеристик тел. Для газов она зависит от количества, способа и скорости подвода к ним теплоты. В любом политропном процессе она легко рассчитывается по двум величинам – показателю самой политропы n и его изохорной теплоемкости c_v по соотношению:

$$c = c_v \frac{n - k}{n - 1}.$$

Для воздуха при нормальных условиях $c_p = 1$ кДж/(кг·К), $c_v = 0,72$ кДж/(кг·К), $k = 1,4$.

В термодинамических расчетах, наряду с основными параметрами состояния рабочего тела (p, v, T), используют функции состояния Q, L, U, I, S . Здесь Q – количество тепловой энергии, подведенное к телу массой m , кДж

$$Q = mc(T - T_0); \quad (2)$$

L – количество выполненной работы сжатия или расширения, кДж

$$L = m \frac{R}{n - 1} (T_1 - T_4); \quad (3)$$

где R – газовая постоянная, для воздуха, $R = 0,287$ кДж/(кг·К);

ΔU – изменение внутренней энергии, кДж

$$\Delta U = mc_v(T - T_0); \quad (4)$$

ΔI – изменение энтальпии, кДж

$$\Delta I = mc_p(T - T_0); \quad (5)$$

ΔS – изменение энтропии, как функции состояния, дифференциал которой численно равен отношению количества подведенной теплоты к температуре системы, кДж/К

$$\Delta S = m c \ln(T / T_0). \quad (6)$$

Величины теплоемкостей, входящих в выражения (2) и (4), оставаясь, как и показатель политропы, неизменными в течение всего политропного процесса, свидетельствуют и о постоянстве коэффициента α , учитывающего долю теплоты, затрачиваемую на изменение внутренней энергии рабочего тела, что значительно упрощает исследование термодинамических процессов:

$$\varphi = \Delta U / Q = (n - 1) / (n - k).$$

Для анализа термодинамических процессов широко используют диаграммы p - v и T - s , представленные на рисунках 1 и 2. При этом изохорный ($n = \infty$, $c = c_v$) и изобарный ($n = 0$, $c = c_p$) процессы на p - v и диаграмме изображаются линиями, параллельными осям соответствующих диаграмм, а изотермический ($n = 1$, $c = \infty$) – и адиабатный (или по другому изоэнтропный с $n = k$ и $c = 0$) параллельными осям T - s . При этом площадь под кривой процесса в p - v диаграмме соответствует работе термодинамического процесса (l), а в T - s диаграмме – количеству теплоты (q), участвующей в процессе.

По диаграммам легко определить области, в которых процессы происходят с положительной или отрицательной работой, подводом или отводом тепла, ростом или уменьшением внутренней энергии и энтальпии рабочего тела. Границами этих зон являются соответственно изохора, адиабата и изотерма. Таким образом, заштрихованные на рисунках 1 и 2 зоны соответствуют политропным процессам с отрицательной теплоемкостью, для которых $k > n > 1$.

Эти процессы характерны для сжатия и расширения рабочего тела в тепловых машинах и имеют большое практическое значение. При сжатии в них внешняя работа отрицательна и теплота отводится от рабочего тела. Однако изменение внутренней энергии положительно, т.к. работа, затрачиваемая на сжатие газа, больше отводимой теплоты.

При расширении положительная работа совершается как за счет подводимого тепла, так и за счет внутренней энергии рабочего тела и температура его уменьшается.

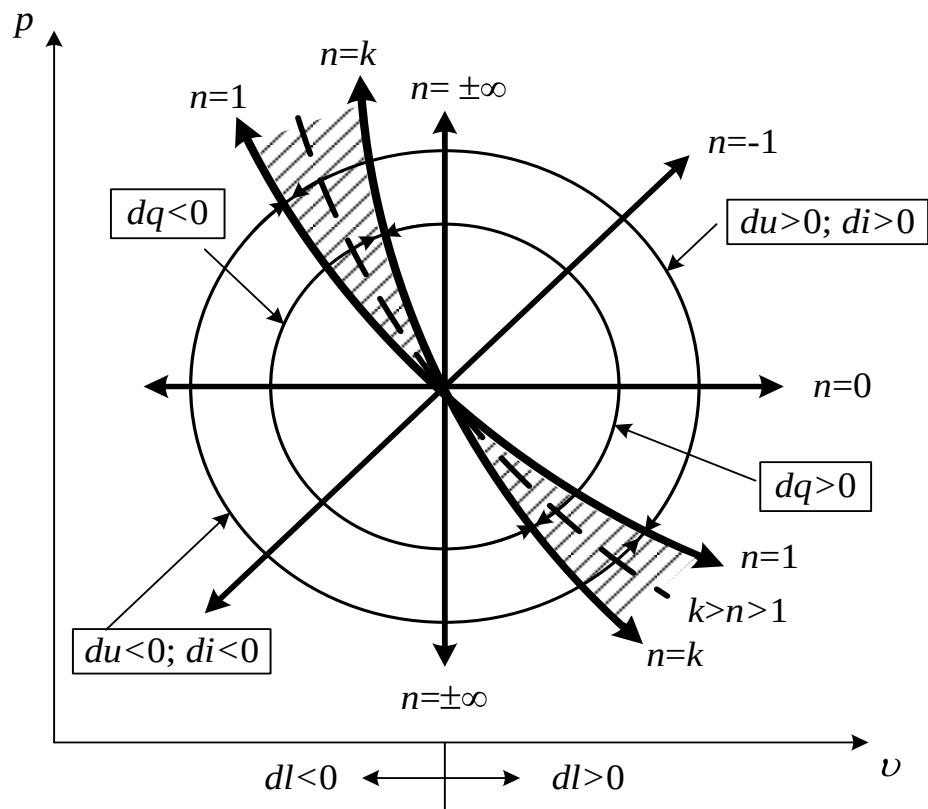


Рисунок 1 – Графики политропных процессов в p - v координатах

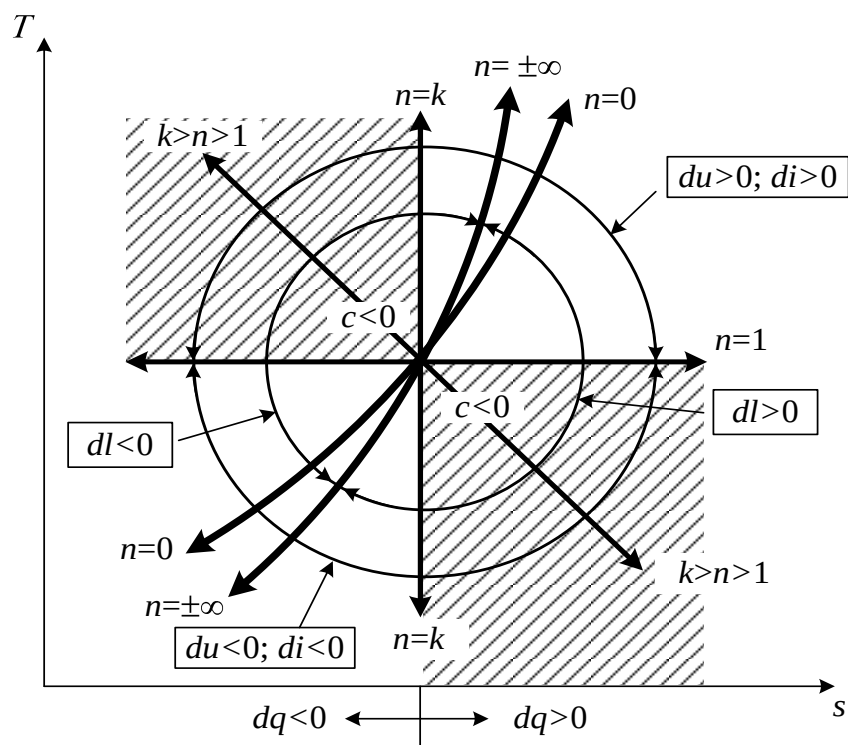


Рисунок 2 – Графики политропных процессов в T - s координатах

Исследование политропных процессов предполагает:

- установление экспериментальных зависимостей между основными параметрами рабочего тела;
- обработку полученных данных, выбор математической модели процесса, оценку ее соответствия молекулярно-кинетической теории идеальных газов и определение показателя политропы;
- вычисление термодинамических функций и построение p - v и T - s диаграмм.

При этом используются основные положения теоретической термодинамики, которые включают:

- первый закон термодинамики – теплота Q , Дж, подведенная к рабочему телу, расходуется на изменение его внутренней энергии ΔU и на совершение работы против внешних сил L (работы изменения объема)

$$Q = \Delta U + L,$$

или для 1 кг рабочего тела q , Дж/кг

$$q = \Delta u + l;$$

- уравнение состояния рабочего тела (уравнение Клапейрона), которое для идеального газа имеет вид:

$$pV = mRT,$$

или

$$p\nu = RT,$$

где p – абсолютное давление, Па;

V – объем, занимаемый рабочим телом, м³;

m – масса рабочего тела, кг;

R – газовая постоянная, кДж/(кг·К);

T – абсолютная температура, К;

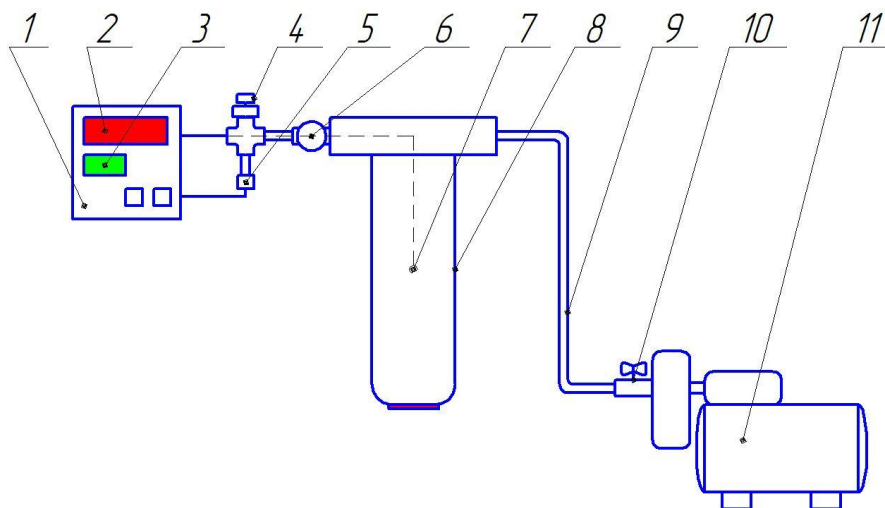
ν – удельный объем рабочего тела, $\nu = \frac{V}{m}$, м³/кг.

3 Описание лабораторной установки

Универсальная лабораторная установка для изучения газовых законов представленная на рисунках 3, 4, соответствует целям поставленных исследований и позволяет:

- изучить основные особенности политропных изопроцессов (изотермического, изохорного, изобарного и изоэнтропного процессов);

- определить значения показателя политропы, параметров рабочего тела и термодинамических функций процесса, в том числе и скрытых от непосредственного наблюдения, таких как мгновенная температура, изменение внутренней энергии, энтропии и т.п.;
- ознакомит учащихся с современными методами контроля и управления термодинамическими процессами;



1 – измеритель-регулятор ТРМ, 2 – дисплей для отображения температуры в емкости, 3 – индикатор давления в емкости, 4 – вентиль плавного спуска давления, 5 – датчик давления, 6 – электроклапан, 7 – термопара внутри емкости, 8 – емкость для нагнетания, 9 – магистраль подвода избыточного давления, 10 – кран подачи избыточного давления, 11 – компрессор.

Рисунок 3 – Схема экспериментальной установки



Рисунок 4 – Фотография экспериментальной установки

Установка представляет собой воздушный компрессор, настроенный на избыточное давление 100 – 150 кПа. Компрессор оснащен стрелочным манометром и предохранительным клапаном, контролирующим заданное давление. В установку так же входят закрепленный на лицевой панели герметичный сосуд из нержавеющей стали объемом 2000 мл, электронагреватель и коллектор с запорным краном, регулируемым вентилем сброса избыточного давления и выходами датчиков измерения давления и температуры воздуха в сосуде. Показания датчиков отображаются на цифровых табло двухканального измерительно-регулирующего прибора ТРМ 202 и передаются в компьютерную систему непрерывной регистрации и автоматической обработки экспериментальных данных.

4 Методика выполнения работы

Методика предусматривает реализацию ряда термодинамических процессов.

Реализацию *изохорного процесса*, происходящего в любой физической системе при постоянном объёме ($\nu = \text{const}$). Поглощаемая в процессе газом теплота целиком тратится на увеличение его внутренней энергии, и температура его повышается (уменьшается при отводе тепла). При этом абсолютное давление газа изменяется пропорционально его абсолютной температуре. На диаграмме p - ν , приведенной на рисунке 5, этот процесс изображается изохорами. Для идеального газа они являются прямыми линиями перпендикулярными оси ν .

При *изотермическом процессе* газу сообщается (или отнимается) при неизменной температуре определённое количество теплоты и совершается положительная или отрицательная внешняя работа. Поэтому первый закон термодинамики в изотермическом процессе для идеального газа записывается как

$$Q = A, \Delta U = \text{const}.$$

То есть все тепло, подведенное к газу, тратится на совершение механической работы. Этот процесс обратим, и произведение давления на объём $p\nu$ в нем постоянно. Изотермы идеального газа в координатах p - ν представляют собой гиперболы, расположенные на графике тем выше, чем выше температура, при которой происходит тот или иной изотермический процесс.

При неизменной температуре и массе газа, медленном дросселировании или заполнении сосудов давление в них всегда обратно пропорционально занимаемым объемам.

Альтернативный изотермическому процесс, при котором теплообмен с окружающей средой отсутствует, называется *адиабатическим*. При этом

если в общем случае термодинамический процесс включает в себя три составных процесса – теплообмен, механическую работу и изменение внутренней энергии рабочего тела, то адиабатический процесс в силу отсутствия теплообмена ($\Delta Q = 0$) ограничивается двумя последними процессами. Поэтому, первый закон термодинамики в этом случае приобретает вид

$$Q = 0, A = \Delta U.$$

Теоретически адиабатический (*изоэнтропный*) процесс существует лишь при мгновенном сжатии или расширении газа, когда обмен тепловой энергией газовой среды с окружающей средой вследствие малого времени может не приниматься во внимание. При той же степени сжатия по сравнению с изотермическим процессом, абсолютная температура и давление газа здесь увеличиваются на 10-20 %.

Адиабатическими можно считать быстропротекающие процессы при прохождении звуковой волны в небольших объёмах газа. В настоящей работе приближение к адиабатическому процессу достигается быстрым в течение десятых долей секунды сбрасыванием избыточного давления идеального газа, находящегося в закрытом сосуде, в окружающую атмосферу.

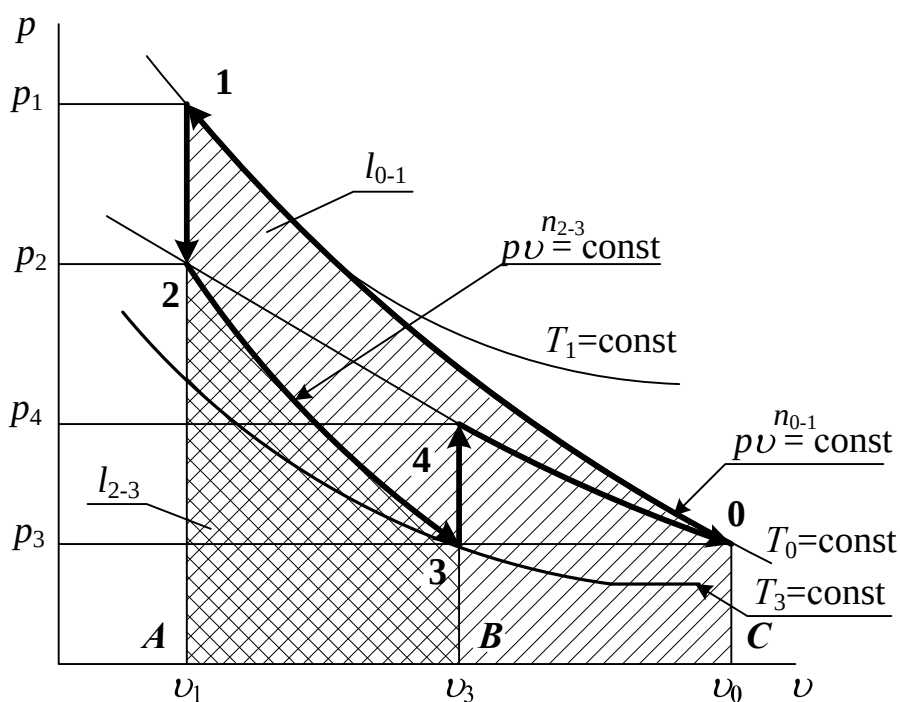


Рисунок 5 – Пример p - v диаграммы процесса

5 Порядок выполнения работы

5.1 Изучить методические указания, заготовить форму отчета о проведенной работе, в которую внести название и цель работы, основные сведения об изучаемых процессах, схему экспериментальной установки, таблицу 1 записи результатов экспериментальных данных.

5.2 Включить установку в сеть и запустить автоматическим выключателем.

5.3 Подключить стенд к USB разъему компьютера.

5.4 Запустить программу «Пуск→MeasLAB→Политропные процессы». Лицевая панель лабораторной работы приведена на рисунке 6.

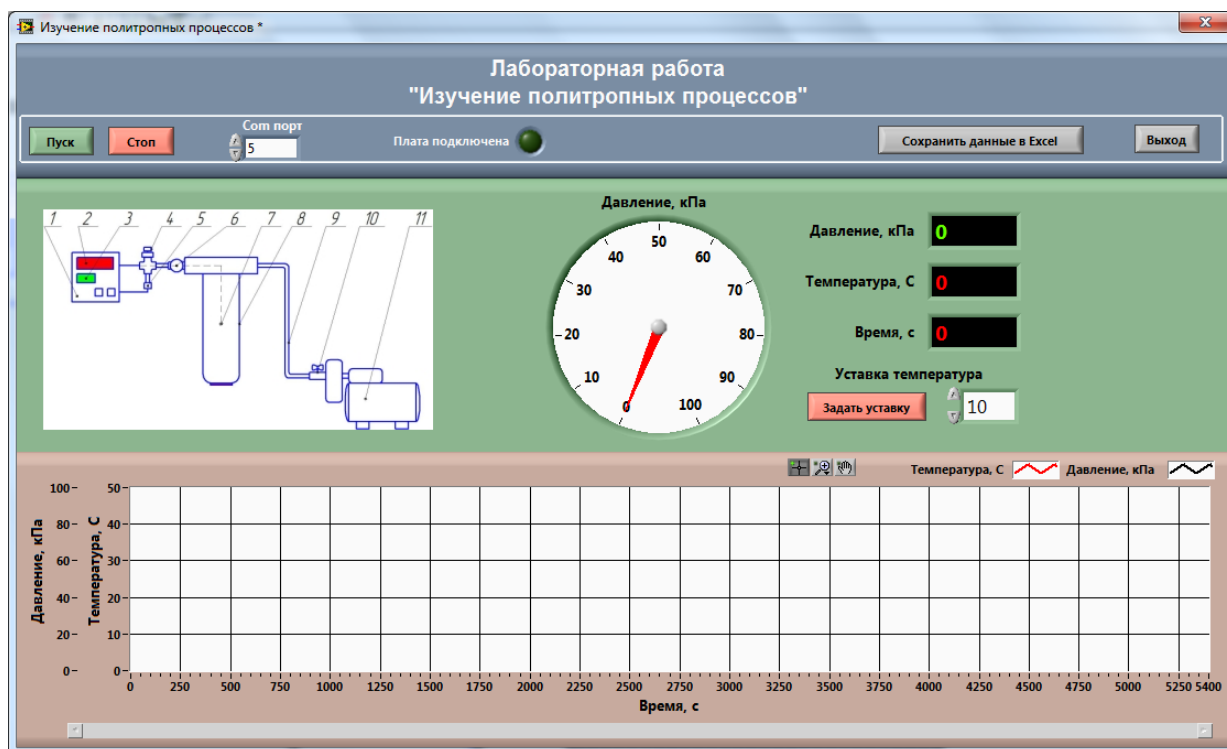


Рисунок 6 – Лицевая панель лабораторной работы

5.5 Убедиться по манометру на компрессоре и отображаемому показанию датчика давления в программе, что остаточного давления в системе нет, в противном случае клавишей ВК 2 включить электро-клапан 6 и сбросить давление до 0.

5.6 Открыть кран 10 и запустить компрессор 11 в работу клавишей ВК 1, при достижении давления 150-200 кПа закрыть кран и наблюдать процесс 0-1 политропного сжатия воздуха, во время которого давления от значения p_0 переходить в давление p_1 , а температура из T_0 в T_1 .

5.7 Закрыть кран 10 и наблюдать изохорный процесс, во время которого воздух в емкости охлаждается и температура от T_1 переходит в состояние T_0 , а давление из p_1 переходить в состояние p_2 .

5.8 Далее следует нажать клавишу ВК 2 и включится электро-клапан, как только давление в системе станет равно p_0 , следует выключить ВК 2 и закрыть электро-клапан. Вследствие чего, температура в емкости от T_0 перейдет в состояние T_3 .

5.9 Далее начинается процесс изохорного нагрева воздуха, в виду того, что газ произвел работу и охладился, а далее опять температура выравнивается с окружающей средой до T_0 , а давление из состояния p_0 перейдет в состояние p_4 .

5.10 Затем вентилем плавного спуска 4 дросселируем воздух, при котором давление падает до значения p_0 , а энтальпия остается постоянной, температура также не изменяется.

5.11 Занести все граничные параметры в таблицу 1 и произвести вычисления по предлагаемому алгоритму ниже.

5.12 Ответить на контрольные вопросы и сделать самостоятельные выводы по выполненной работе.

6 Обработка полученных результатов

6.1 Обработку опытных данных начинаем с расчетов удельного объема воздуха ν_i , при соответствующих давлениях ($p_0...p_4$)

$$\nu_i = \frac{R T_i}{p_i},$$

где R – универсальная газовая постоянная для сухого воздуха, $R = 0,287$ кДж/(кг·К);

T_i – абсолютная температура воздуха, К;

p_i – абсолютное давление, соответствующее процессу, Па.

6.2. Значение энтропии в любом состоянии рассчитывается по формуле

$$s_i = c_v \ln\left(\frac{T_i}{273}\right) + R \ln\left(\frac{\nu_i}{\nu_0}\right),$$

где $c_v = 0,72$ кДж/(кг·К).

6.3 Рассчитываем показатель политропы в исследуемом процессе

$$n = \frac{\ln\left(\frac{p_{i-1}}{p_i}\right)}{\ln\left(\frac{\nu_i}{\nu_{i-1}}\right)}.$$

6.4. Определяем теплоемкость воздуха в исследуемом процессе

$$c = c_v \frac{n-k}{n-1},$$

где $k=1,4$.

6.5 Определяем изменение внутренней энергии воздуха

$$\Delta u = c_v (T_i - T_{i-1}).$$

6.6 Рассчитываем изменение энтропии воздуха

$$\Delta s = c_v \ln \left(\frac{T_i}{T_{i-1}} \right) + R \ln \left(\frac{v_i}{v_{i-1}} \right).$$

6.7 Определяем количество тепла, отводимого через стенки цилиндра

$$q = c (T_i - T_{i-1}),$$

где c – теплоемкость для текущего процесса.

6.8 Рассчитываем работу сжатия

$$l = \frac{R}{n-1} (T_{i-1} - T_i).$$

6.9 Определяем долю теплоты, расходуемой на изменение внутренней энергии

$$\varphi = \frac{\Delta u}{q},$$

или

$$\varphi = \frac{(n-1)}{(n-k)}.$$

6.10 Результаты обработки для каждого из исследованных процессов заносим в таблицу 1.

6.11 Строим графики процессов в p - v и T - s координатах.

Таблица 1 – Результаты измерения параметров состояния и расчета термодинамических функций воздуха в политропном процессе

Параметр состояния	Номер точки процесса					
	0	1	2	3	4	0
p , кПа						
T , К						
ν , м ³ /кг						
s , кДж/(кг·К)						
	Процесс					
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-0	
кДж/(кг·К)						
кДж/кг·						
кДж/(кг·К)						
кДж/кг·						
кДж/кг·						
φ						

7 Содержание отчёта

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- цель работы;
- схему экспериментальной установки и краткое описание методики проведения работы;
- таблицу измерений и вычислений;
- все необходимые расчеты согласно цели работы;
- графики процессов в p - ν и T - s координатах;
- выводы по работе.

8 Контрольные вопросы

8.1 Какой процесс называется политропным? Каковы показатели политропы для основных изопроцессов?

8.2 Записать уравнение для определения теплоемкости политропного процесса и показать, как из него можно получить теплоемкости всех основных политропных процессов.

8.3 В каких процессах внутренняя энергия идеального газа увеличивается и в каких она уменьшается?

9 Основные опасные моменты

При проведении работ возможно поражение электрическим током, поэтому категорически запрещается прикасаться к токоведущим частям

стенда. При обнаружении неисправностей следует немедленно обесточить установку и сообщить об этом преподавателю. Запрещается повторное включение установки до устранения всех неисправностей.

Литература

- 1 Кириллин В.А. Техническая термодинамика: учебник для вузов/ В.А. Кириллин, В.В.Сычев, А.Е. Шейндлин. – М.: Изд. МЭИ, 2008. – 496 с.
- 2 Теплотехника/ В.Н. Луканин и др. – М.: Высшая школа, 2008 – 671 с.
- 3 Ерохин В.Г. Основы термодинамики и теплотехники. – 2-е изд., стереот/ В.Г. Ерохин, М.Г. Маханько. – М.: Изд. ЛИБРОКОМ, 2009. – 224 с.
- 4 Адиабатический процесс. Открытая энциклопедия. Ил. статья с видеоматериалами от 03.01.2012.
- 5 Жуховицкий Д.Л. Термодинамика и теплопередача: лабораторный практикум/ Д.Л. Жуховицкий. – Ульяновск: УлГТУ, 2000. – 88 с.