**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

**Санкт-Петербургский государственный**

**электротехнический университет**

**«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)**

**Кафедра физики**

отчет

**по лабораторной работе №9**

**по дисциплине «Физика»**

Тема: исследование термодинамических циклов

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Студент гр. 0336 |  | Шишкин Ф.С. |
| Преподаватель |  | Ходьков Д.А. |

Санкт-Петербург

2021

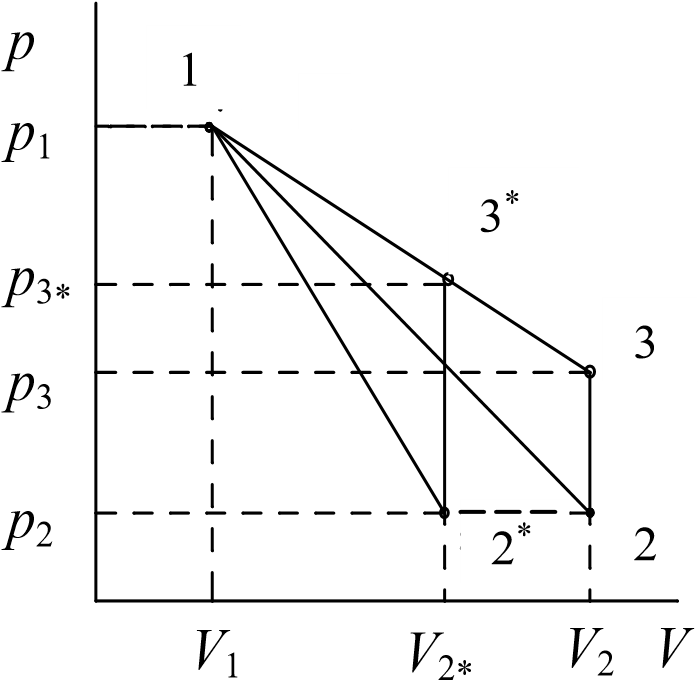
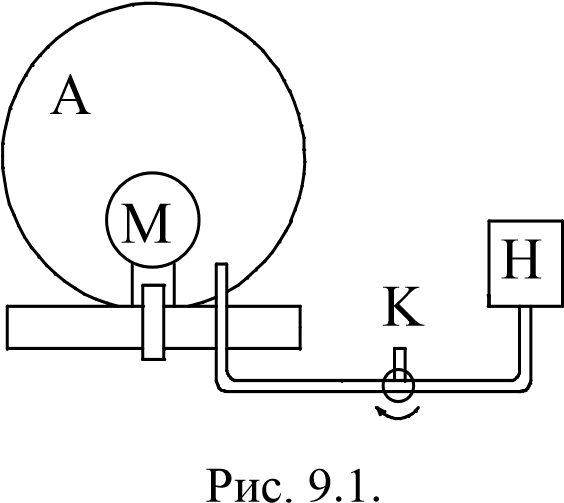
**Цель работы.**

исследование политропно-изохорно-изотермического (*nVT*) и адиабатно-изохорно-изотермического (*SVT*) циклов.

**Приборы и принадлежности:**

баллон с воздухом, манометр, микрокомпрессор, лабораторные термометр и барометр.

**Исследуемые закономерности.**

*Метод измерений*. Используемая в работе установка изображена на рис. 9.1. Баллон *А* объёмом может сообщаться либо с насосом H, либо с атмосферой. Внутрь баллона помещён манометр М, измеряющий избыточное давление. Одно деление шкалы равно 4 мм вод. ст., что составляет 40 Па. Рабочим газом является воздух. В исходном состоянии параметры состояния воздуха, следующие: внешнее давление и комнатная температура . Диаграмма исследуемого цикла в координатах (*p,V*) показана на рис. 9.2.

Вначале насосом в баллон накачивают воздух до давления *p*1 *= p*2 *+* *p*1 (рис. 9.2 (*p*1; *V*1)). При сжатии воздух нагревается, поэтому после закрытия крана необходимо выждать некоторое время, пока температура воздуха в баллоне не сравняется с температурой окружающей среды (при этом прекращается движение стрелки манометра).

Рис. 9.2.

Затем воздух выпускают через кран К в атмосферу в течение нескольких секунд. Когда стрелка манометра приблизится к нулю, кран закрывают. В этот момент давление воздуха баллоне становится *p*2 (рис. 9.2 (*p*2; *V*2).) Изменение параметров состояния воздуха в процессе расширения отражает линия *1–2* на рис. 9.2, которая является политропой.

После закрытия крана охлаждённый при расширении воздух изохорически нагревается до температуры окружающей среды в результате теплообмена с ней. Изменение параметров состояния воздуха отражает линия *2–3* рис. 9.2, которая является изохорой. Температура воздуха в баллоне становится равной температуре в точке *l* (*T*3 = *T*1), следовательно, точки *1* и *3* лежат на одной изотерме.

После выравнивания температур давление в баллоне изменится на *p*3 и станет *p*3 = *p*2 + *p*3 (рис. 9.2 (*p*3; *V*2)). Таким образом, *p*1 и *p*3 *–* это изменения давления на участках *1–2* и *2–3*. Участки *1–2* и *2–3* на диаграмме можно аппроксимировать прямыми, так как изменения параметров *p*, *V*, *T* в данной работе малы и много меньше абсолютных значений соответствующих величин.

В работе изучается политропно-изохорно-изотермический (*nVT*) цикл. Для сравнения с *nVT* циклом используется адиабатно-изохорно-изотермический (SVT) цикл, отличающийся тем, что процесс расширения газа на участке 1*–*2\* рассматривается как адиабатический. Изучение циклов осуществляется путем их моделирования при значениях показателя адиабаты γ=1,4 и показателя политропы n, определенным опытным путем.

**Определение показателя политропы.** Первое начало термодинамики формулируется следующим образом: сообщённое системе количество теплоты расходуется на увеличение внутренней энергии *dU* системы и совершение системой работы :

,

где – теплоёмкость газа в изохорном процессе.

*nVT*-цикл. Процесс расширения воздуха на участке 1*–*2 (рис. 9.2) является политропным, в котором теплоёмкость газа С остаётся постоянной. Первое начало термодинамики для политропного процесса имеет вид

или ,

где *C* – теплоемкость воздуха в политропном процессе, . Из этого соотношения с помощью уравнения состояния идеального газа можно получить уравнение Пуассона для политропного процесса *T* = const или  = const, где *n* – показатель политропы,

где и – теплоемкости газа в изобарном и изохорном процессах.

*SVT-цикл*. Предположим, что процесс расширения воздуха на участке 12\* (рис. 9.2) является адиабатным. Адиабатный процесс является одним из видов политропных процессов, он происходит без теплообмена с окружающей средой: *Q* = 0 и теплоемкость газа в этом процессе *С*=0. Поэтому показатель политропы в этом процессе равен и называется показателем адиабаты. Взаимосвязь между параметрами состояния в адиабатном процессе также описывается уравнениями Пуассона либо объединенным газовым законом.

Показатель политропы *n* может быть определён экспериментально. Выразим n через экспериментально измеряемые величины, для чего продифференцируем уравнения политропы ( = const) и изотермы ( = const): для политропы и для изотермы. Откуда

При относительно малых изменениях *p* и *V* угловые коэффициенты политропы 12 и изотермы 13 (см. рис. 9.2) рассчитывается по формулам

где . Из этих и приведенных выше соотношений получаем формулу

(1)

Зная *n*, можно определить мольную теплоемкость газа в политропном процессе (мольные величины обозначаем соответствующими строчными буквами)

, (2)

где показатель адиабаты, равный отношению теплоемкостей газа в изобарном и изохорном процессах, , *i* число степеней свободы молекул газа, *R*=8,31 Дж/(K/моль) – универсальная газовая постоянная. Воздух можно считать двухатомным газом, для которого при небольших температурах

На участке *12* воздух охлаждается, а тепло через стеклянную колбу поступает в систему (*dQ* > 0, *dT* < 0) поэтому теплопоемкость газа в политропном процессе c = *dQ/dT* – отрицательна. Это означает согласно формуле (2), что на участке *1–2* показатель политропы 1< n < .

*Расчет изменения внутренней энергии и работы газа на участках цикла.* Так как в цикле и в изотермическом процессе

, то изменение внутренней энергии газа в политропном процессе и в изохорном процессе одинаковы по величине и противоположны по знаку. Тогда

, (3)

где ν – число молей воздуха в баллоне, определяемое по уравнению состояния (уравнение Менделеева-Клапейрона).

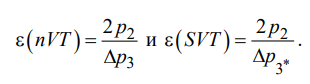
Работа расширения (сжатия) газа в политропическом и изотермическом процессах может быть рассчитана по формулам:

(4)

*Расчёт холодильного коэффициента.* Цикл, изучаемый в данной работе, является холодильным (ориентирован против часовой стрелки). Его эффективность принято характеризовать холодильным коэффициентом , который определяется как отношение теплоты, отнятой от охлаждаемого газа, к затраченной в цикле работе. Для *SVT*-цикла с учетом и холодильный коэффициент равен (обозначения цифровых индексов согласованы с рис. 9.2).

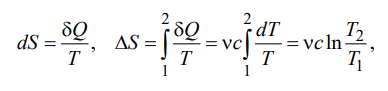
а для *nVT* -цикла в предположении

Перепишем выражения для , используя экспериментально измеряемые величины давлений, для чего значения работы и определим графическим способом. В *рV*-координатах (рис. 9.2) они равны площадям трапеций, основания которых и = (либо или ), а высоты – () и () соответственно. Учитывая, что , получим



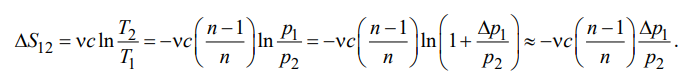
В проводимом опыте , поэтому отношение холодильных коэффициентов .

*Расчет изменения энтропии*. Функция состояния, дифференциалом которой является отношение , называется энтропией:

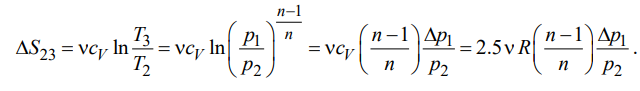


где *c* – мольная теплоемкость газа, зависящая от типа политропного процесса (адиабатный, изохорный, изобарный и т.п.). Отметим, что данное выражение справедливо лишь для обратимых процессов, то есть процессов, которые могут быть проведены в обратном направлении через те же промежуточные состояния, что и при прямом процессе; при этом тепловое состояние окружающей среды не изменяется (процесс без теплопотерь).

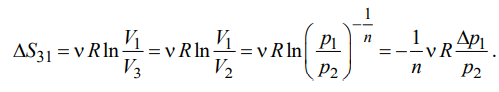
Выразим изменение энтропии через экспериментально определяемые в опыте величины давлений сначала для -цикла. В политропном процессе (на участке *1–2*) с учетом уравнения Пуассона



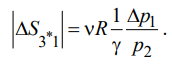
В изохорном процессе (на участке *2–3*) изменение энтропии с учетом , а также уравнения Пуассона равно:



В изотермическом процессе (на участке *3–1*)



Для *SVT-*цикла изменение энтропии в адиабатном процессе (на участке 1 – 2\*) равно нулю. С учетом, что изменение энтропии в цикле также рано нулю, заключаем, что изменения энтропии в изохорном и изотермическом процессах равны по величине, но различаются знаком:



**Протокол наблюдений к лабораторной работе №9.**

исследование термодинамических циклов

Таблица 9.1.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |
| 102,8\*103 | 22,4 | 25 | 298 |

Таблица 9.2.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|  | 660 | 670 | 660 | 670 | 680 | 660 | 680 | 670 | 660 | 680 |
|  | 180 | 190 | 190 | 185 | 185 | 175 | 180 | 180 | 180 | 185 |

Студент гр. 0336 Шишкин Ф.С.

**Обработка результатов эксперимента.**

1. Используя данные Таблицы 9.2, рассчитайте в делениях шкалы манометра избыточные давления с . N = 10 – кол-во наблюдений,
2. Расчёт

0,23\*20=4,6 Па

1. Расчёт

0,23\*15=3,45 Па

1. Рассчитайте показатель политропы с Р = 95% на участке 1–2 *nVT* цикла. При выводе формулы погрешности функцию (1) удобно прологарифмировать.

, ,

1. Выразите избыточные давления и в Па, а комнатную температуру *T*1 в К (одно деление шкалы манометра равно 40 Па). Рассчитайте давления *p*1 и *p*3, выразив их в Па.

T1 = 298 K,,

1. Рассчитайте параметры состояния (*p,V,T*)в точках 1, 2 и 3 *nVT*-цикла, а также в точках 1\*, 2\* и 3\* SVT-цикла, используя уравнения политропического и адиабатического процессов. При расчётах используйте экспериментальные значения изменения давления и и величину , измеренную барометром. Рассчитанные значения параметров (*p,V,T*) в вершинах *nVT*- и *SVT*- циклов сведите в две отдельные таблицы.

|  |  |
| --- | --- |
| Cостояние 1(1\*):  p1 = p2 + Δp1 = 103469  V1 = 22,4 л = 22,4\*10 -3 м3  T1 = 298 К | Состояние 2\*:  p2\* = p2 = 102800  Уравнение политропы:  Газ двухатомный, i = 5.  Уравнение состояния:  ; |
| Состояние 2:  p2 = 102800  Уравнение политропы:  n = 1,37  068  Уравнение состояния: |
| *Cостояние 3\*:*  *T*3*\** = *T*1 = 298K  *V*3*\** = *V*2*\*;*  = 20,997  Уравнение состояния: |
| *Cостояние 3:*  *p*3 = *p*2 + Δ*p*3 =  *T*3 = *T*1 = 298К  Уравнение состояния: |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Точка | 1 | 2 | 3 |
|  | 103469 | 102800 | 102983 |
|  | 0,0224 | 0,02241 | 0,2241 |
|  | 298 | 297,9391 | 298 |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Точка | 1\* | 2\* | 3\* |
|  | 103469 | 102800 | 103422,829 |
|  | 0,0224 | 0,02241 | 0,2241 |
|  | 298 | 297,9391 | 298 |

1. Постройте *nVT*- и *SVT*-циклы в координатах (*р, V*) на миллиметровой бумаге в удобном масштаб.
2. Рассчитайте изменения внутренней энергии, величину работы газа и поглощаемое (отдаваемое) им количество теплоты для всех процессов *nVT* цикла. Для участка *1-2* используйте при расчетах определенное в опыте значение мольной теплоемкости воздуха в политропном процессе. Проверьте выполнение первого начала термодинамики для каждой из ветвей цикла и всего цикла.

1-2: , ,

2-3:

3-1:

1. Рассчитайте холодильные коэффициенты для *nVT*- и *SVT*-циклов. Сравните значения холодильных коэффициентов, полученные расчетным путем, с холодильными коэффициентами обратимого цикла Карно, построенного в пределах тех же максимальных и минимальных температур циклов, т. е. Т1, Т2 и Т2\* соответственно. Обратите внимание, что холодильные коэффициенты обратимых циклов Карно меньше, чем холодильные коэффициенты рассматриваемых циклов.

*Цикл nVT (1-2-3-1):*

*Цикл SVT (1-2\*-3\*-1):*

Для *1839,642*

Для *= 4892,268*

1. Используя уравнения состояния идеального газа, найдите число молей воздуха в сосуде ν по известным значениям *p*2*, V*1*, T*1 в Таблице 9.1. Считается, что число молей газа при его сжатии и расширении в исследуемом цикле – постоянная величина.
2. Рассчитайте мольную теплоемкость СV воздуха при постоянном объеме, а по формуле (2) – его мольную теплоёмкость c в политропном процессе.

= 1,68

= 20,75

1. Рассчитайте изменение энтропии всех процессов в *nVT*- и *SVT*-циклах.

*Цикл nVT (1-2-3-1):*

Политропа *1-2 :* ≈ 0,00358

Изохора *2-3:* ≈ 0,00359

Изотерма *3-1:* ≈ -0,00389

Изменение энтропии за цикл

*Цикл SVT (1-2\*-3\*-1):*

Адиабата *1-2\* : = 0*

Изохора *2\*-3\**: ≈ 0,00381

Изотерма *2\*-3\* -*≈ -0,00381

Изменение энтропии за цикл 0

**Выводы.**

Исследовали политропно-изохорно-изотермический (*nVT*) и адиабатно-

изохорно-изотермический (*SVT*) циклы.

**Контрольные вопросы:**

1. Первое начало термодинамики. Как оно выглядит в различных изопроцессах?
2. Два определения энтропии
3. **Первое начало термодинамики** – это обобщение закона сохранения энергии с учетом тепловых процессов. Его формулировка выглядит так: кол-во теплоты, сообщенное системе, расходуется на выполнение работы против внешних сил и изменение ее внутренней энергии.

1.**Изохорный процесс**. В этом процессе объем остается постоянным, поэтому dA=PdV=o

В изохорном процессе теплота, подведенная к системе, полностью расходуется на изменение ее внутренней энергии

**2.Изобарный процесс**. Т.к. объем изменяется, то при подведении теплоты к системе она частично превращается в работу и поэтому первое начало термодинамики имеет вид ΔU = Q — Аг

**3.Изотермический процесс.** При постоянной температуре изменение внутренней энергии идеального газа не происходит – dU=0, поэтому в изотермическом процессе вся теплота, подведенная к газу, расходуется на совершение работы

2. **Энтропия** качественно отличается от других термодинамических величин таких как давление, объём или внутренняя энергия, потому что является свойством не системы, а того, как мы эту систему рассматриваем

**Энтропия**– функция состояния термодинамической системы, которая характеризует хаотичность (неупорядоченность) системы. Энтропию часто называют приведенной теплотой, т.к. она оказывает отношение теплоты до абсолютной температуры газа