

## 1. ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ И МЕХАНИЧЕСКАЯ РАБОТА

Эксперимент проводится для исследования увеличения внутренней энергии алюминиевого (или медного) тела, вызванного механической работой. Цилиндрическое тело вращается вокруг своей оси с помощью лебедки с ручным приводом. Шнур, проходящий по изогнутой поверхности тела, создает трение и нагревает тело. Сила трения  $F$  соответствует весу груза, подвешенного к концу фрикционного шнура. Работа против трения за  $n$  оборотов тела равна

$$\Delta W_n = F \cdot \pi \cdot d \cdot n \quad (1.1)$$

где  $d$  – диаметр цилиндрического тела.

За время  $n$  оборотов работа трения повышает температуру тела от начального значения  $T_0$  до конечного значения  $T_n$ . В то же время внутренняя энергия увеличивается:

$$\Delta E_n = m \cdot c_{Al} \cdot (T_n - T_0) \quad (1.2)$$

где  $m$  – масса тела,  $c_{Al}$  – удельная теплоемкость материала тела.

Чтобы максимально избежать чистого теплообмена с окружающей средой, перед началом измерения тело охлаждается до начальной температуры  $T_0$ , которая немного ниже комнатной.

Преобразование внутренней энергии соответствует совершенной работе:

$$\Delta E_n = \Delta W_n \quad (1.3)$$

Из уравнений 1.2 и 1.3:

$$T_n = T_0 + \frac{1}{m \cdot c_{Al}} \cdot \Delta W_n \quad (1.4)$$

Измеренные конечные температуры  $T_n$  представляются как функция выполненной работы  $W_n$  (рис. 1.1). Измеренные значения образуют прямую линию, наклон которой можно использовать для определения удельной теплоемкости материала тела.

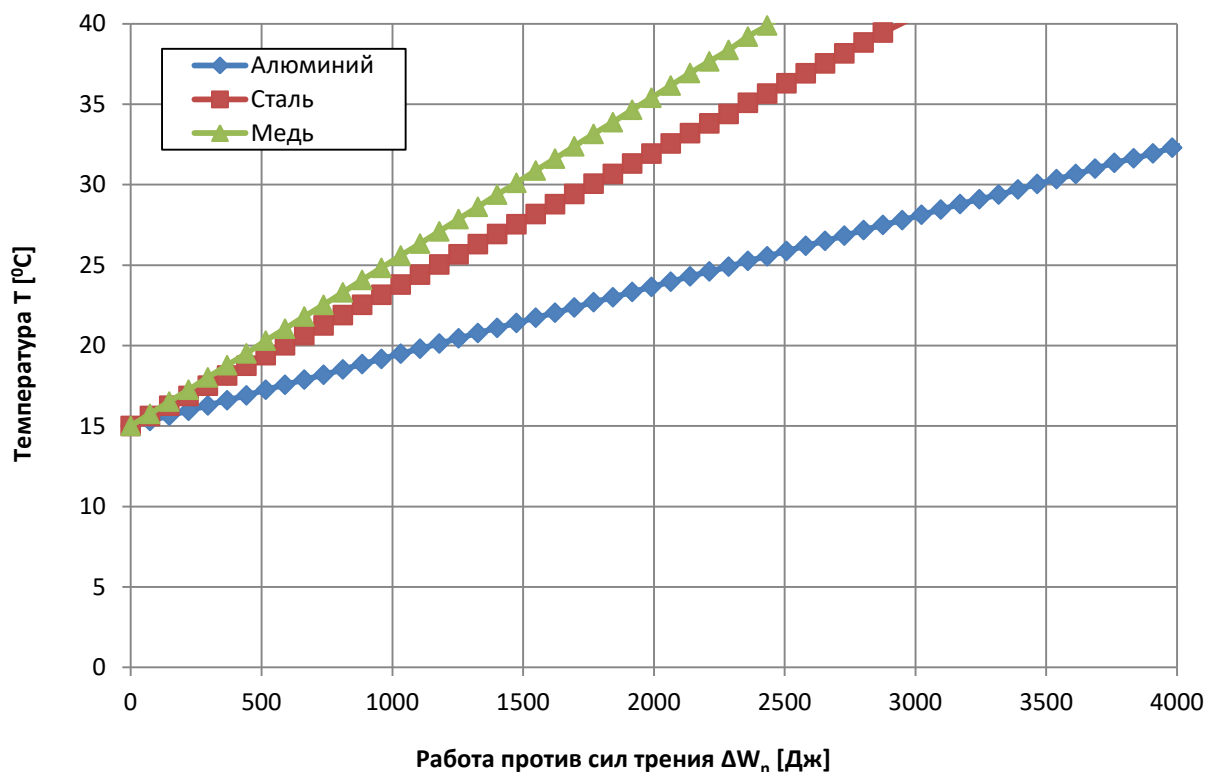


Рис. 1.1 – Зависимость: Температура–Механическая работа ( $T$ – $\Delta W_n$ ) для различных материалов тела

## 2. ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ И РАБОТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Эта лабораторная работа демонстрирует, как внутренняя энергия медных и алюминиевых тел увеличивается за счет работы электрического тока, пропорциональной приложенному напряжению  $U$ , протекающему току  $I$  и времени измерения  $t$ :

$$\Delta W_E(t) = U \cdot I \cdot t \quad (2.1)$$

Работа электрического тока вызывает повышение температуры тела от начального значения  $T_0$  до конечного значения  $T_n$ . Внутренняя энергия увеличивается на величину:

$$\Delta E(t) = m \cdot c \cdot (T(t) - T_0) \quad (2.2)$$

где  $m$  – масса тела,  $c$  – удельная теплоемкость материала тела.

Чтобы максимально избежать чистого теплообмена с окружающей средой, перед началом измерения тело охлаждается до начальной температуры  $T_0$ , которая немного ниже комнатной.

В таких условиях изменение внутренней энергии должно быть равно проделанной работе, что означает следующее:

$$\Delta E(t) = \Delta W_E(t) \quad (2.3)$$

Датчик температуры используется для измерения температуры  $T$  путем измерения его сопротивления, которое зависит от температуры:

$$T = \frac{217}{R^{0.13}} - 151 \quad (2.4)$$

Измеренные таким образом температуры наносятся на график в зависимости от работы электрического тока (рис. 2.1). Удельная теплоемкость материала тела можно определить по наклону прямых линий на графике.

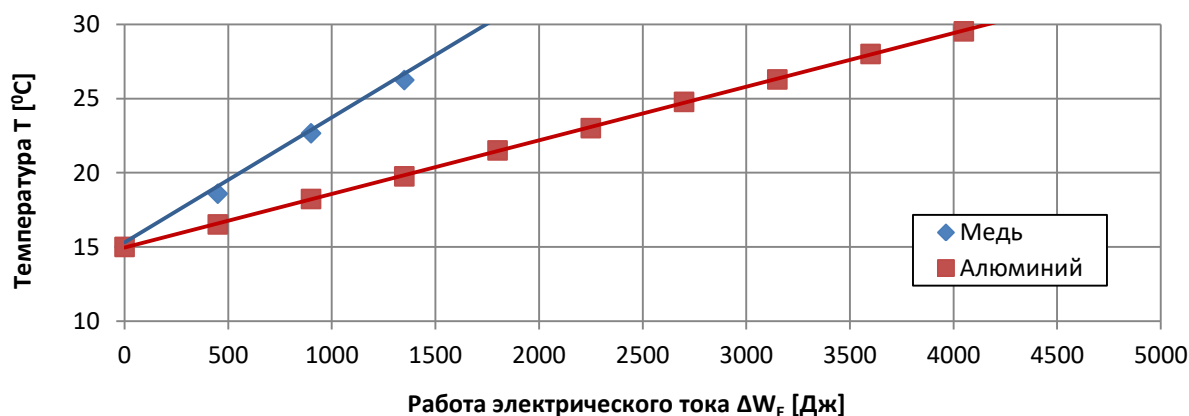


Рис. 2.1 – Зависимость: Температура–Работа электрического тока ( $T$ – $\Delta W_E$ ) для различных материалов тела

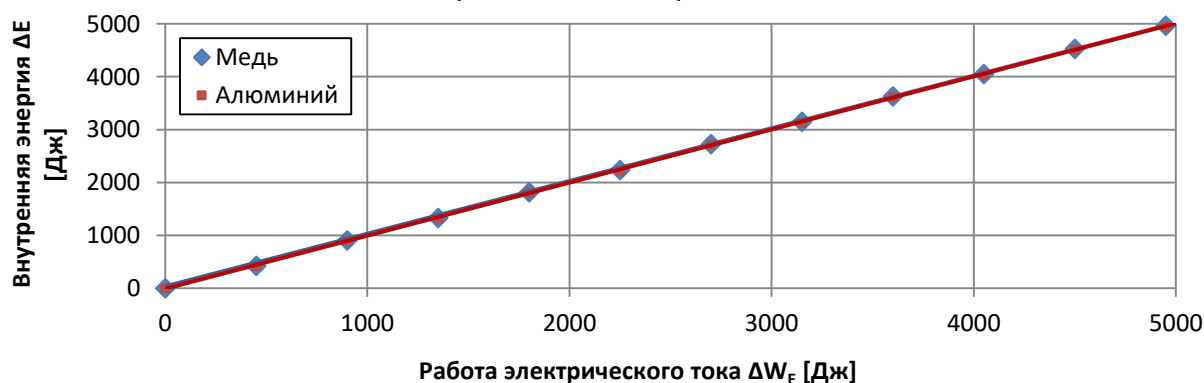


Рис. 2.2 – Зависимость: Внутренняя энергия–Работа электрического тока ( $\Delta E$ – $\Delta W_E$ ) для различных материалов тела

### 3. ЗАКОН БОЙЛЯ-МАРИОТТА

Закон, открытый Бойлем и Мариоттом:

$$p \cdot V = \text{const} \quad (3.1)$$

является частным случаем более общего закона, применимого ко всем идеальным газам. Этот общий закон описывает взаимосвязь между давлением  $p$ , объемом  $V$ , температурой  $T$  относительно абсолютного нуля и количеством газа  $n$ :

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (3.2)$$

где  $R = 8,314 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$  – универсальная газовая постоянная.

Частный случай 3.1 выводится из общего уравнения 3.2 при условии, что температура  $T$  и количество газа  $n$  не меняются.

В эксперименте справедливость закона Бойля-Мариотта при комнатной температуре демонстрируется на примере воздуха как идеального газа. Объем  $V$  воздуха в цилиндрическом сосуде изменяется движением поршня при одновременном измерении давления  $p$  воздуха.

Количество газа  $n$  зависит от начального объема  $V_0$ , в который воздух поступает через открытый клапан перед началом эксперимента.

Поскольку площадь поперечного сечения  $A$  поршня постоянна, объем  $V$  замкнутого воздуха можно легко рассчитать по расстоянию  $s$ , пройденному поршнем (рис. 3.1). Для точного анализа необходимо также учитывать неизбежный мертвый объем  $V_1$  воздуха в манометре.

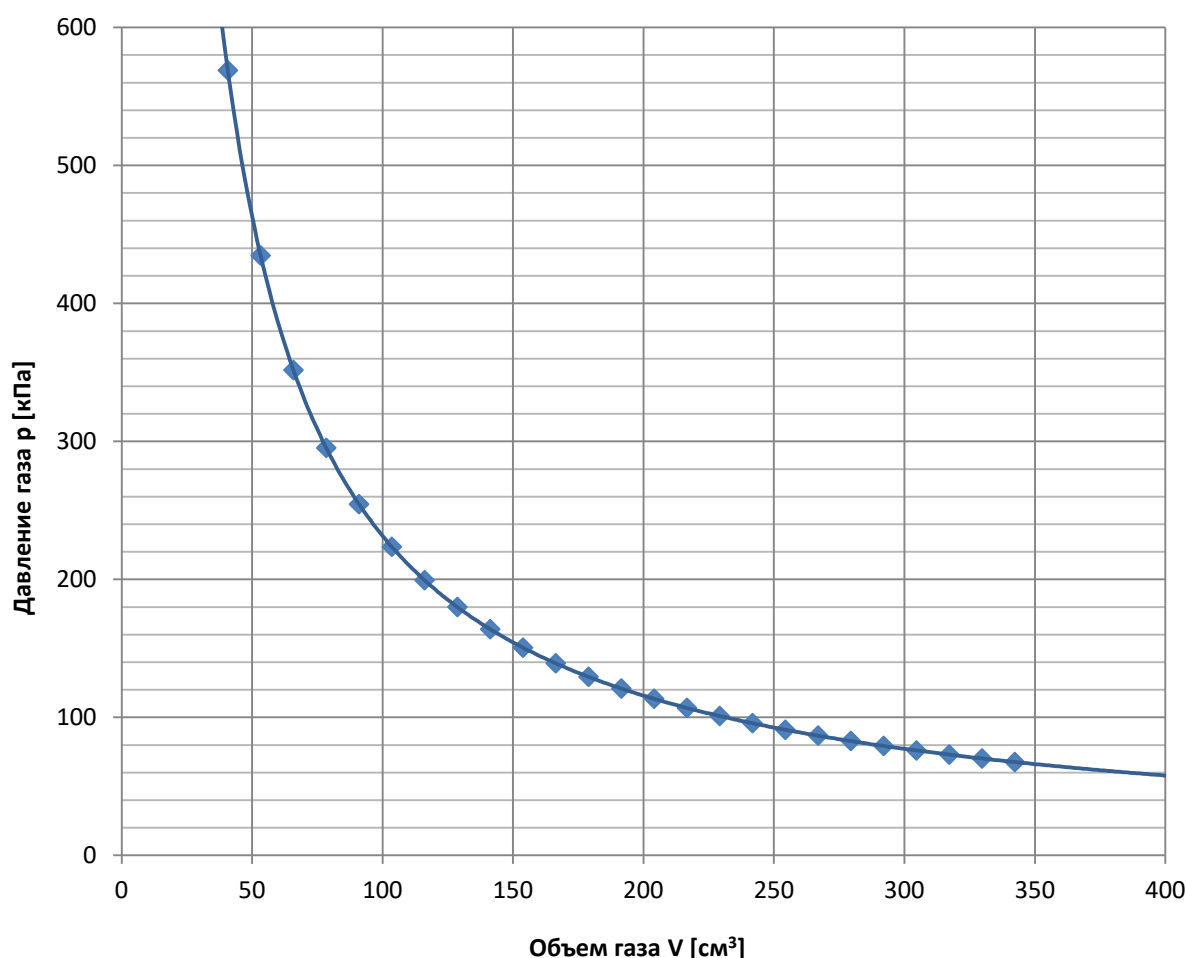


Рис. 3.1 – Зависимость: Давление газа–Объем газа ( $p$ - $V$ ) для количества газа 9,5 ммоль

#### 4. ЗАКОН ГЕЙ-ЛЮССАКА

Закон Гей-Люссака:

$$\frac{p}{T} = \text{const} \quad (4.1)$$

является частным случаем более общего закона, применимого ко всем идеальным газам. Этот общий закон описывает взаимосвязь между давлением  $p$ , объемом  $V$ , температурой  $T$  относительно абсолютного нуля и количеством газа  $n$ :

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (4.2)$$

где  $R = 8,314$  Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная.

Частный случай 4.1 выводится из общего уравнения 4.2 при условии, что температура  $T$  и количество газа  $n$  не меняются.

В лабораторных условиях справедливость закона Гей-Люссака демонстрируется с использованием воздуха в качестве идеального газа. Для этого замкнутый объем воздуха, находящийся в полый металлической сфере (колбе Джолли), нагревается с помощью водяной бани. В то же время температура  $T$  измеряется в °С с помощью цифрового термометра, а давление  $p$  измеряется с помощью манометра, прикрепленного к полый сфере.

Линейная зависимость между давлением и температурой подтверждается проведением прямой линии (рис. 4.1) на графике зависимости давления от температуры:

$$p = a \cdot T + b \quad (4.3)$$

Экстраполируя давление  $p$  до значения 0, можно определить температуру абсолютного нуля:

$$T_0 = -\frac{b}{a} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (4.4)$$

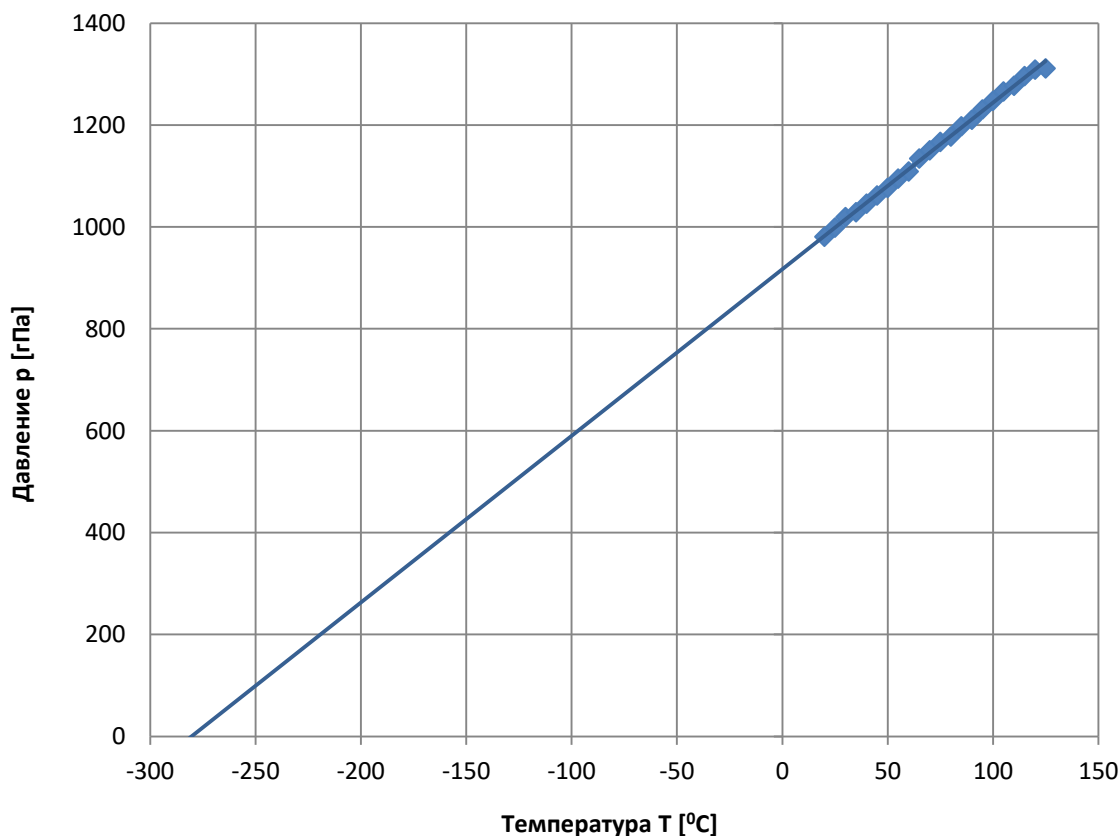


Рис. 4.1 – Зависимость: Давление–Температура ( $p$ - $T$ )  
и экстраполяция давления до значения 0

## 5. ПОКАЗАТЕЛЬ АДИАБАТЫ ВОЗДУХА

Поскольку нет теплообмена с окружающей средой, колебания поршня в стеклянной трубке связаны с адиабатическими изменениями состояния. Следующее уравнение описывает соотношение между давлением  $p$  и объемом  $V$  замкнутого воздуха:

$$p \cdot V^\gamma = \text{const} \quad (5.1)$$

Показатель адиабаты  $\gamma$  – это отношение удельной теплоемкости при постоянном давлении  $C_p$  и постоянном объеме  $C_v$ :

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad (5.2)$$

Из уравнения 5.1 можно вывести следующую зависимость для изменений давления и объема  $\Delta p$  и  $\Delta V$ :

$$\Delta p + \gamma \cdot \frac{p}{V} \cdot \Delta V = 0 \quad (5.3)$$

Подставляя внутреннюю площадь  $A$  поперечного сечения трубки, восстанавливающую силу  $\Delta F$  можно рассчитать по изменению давления. Точно так же отклонение поршня от его положения равновесия может быть определено по изменению объема.

Следовательно,

$$\Delta F = -\gamma \cdot \frac{p}{V} \cdot A^2 \cdot \Delta s = 0 \quad (5.4)$$

Уравнение движения колеблющегося поршня имеет вид

$$m \cdot \frac{d^2 \Delta s}{dt^2} + \gamma \cdot \frac{p}{V} \cdot A^2 \cdot \Delta s = 0 \quad (5.5)$$

где  $m$  – масса поршня.

Решением этого классического уравнения движения для простых гармонических колебаний является период колебаний:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{1}{\gamma} \cdot \frac{V}{p} \cdot \frac{m}{A^2}} \quad (5.6)$$

Исходя из этого, можно рассчитать показатель адиабаты, если известны все другие переменные.

В этой лабораторной работе прецизионная стеклянная трубка малого поперечного сечения  $A$  помещается вертикально в отверстие через пробку стеклянного сосуда большого объема  $V$  (бутыль Мариотта). Алюминиевый поршень известной массы  $m$  может скользить вверх и вниз внутри трубки. Алюминиевый поршень совершает простое гармоничное движение на воздушной подушке, образованной замкнутым объемом воздуха. Показатель адиабаты воздуха можно рассчитать по периоду колебаний поршня.

Равновесный объем  $V$  соответствует объему сосуда, так как объем трубки достаточно мал, чтобы им можно было пренебречь.

$$\gamma = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot \frac{m}{A^2} \cdot \frac{V}{p} \quad (5.7)$$

Равновесное давление  $p$  получается из внешнего давления  $p_0$  воздуха и давления, оказываемого алюминиевым поршнем на замкнутый воздух в его состоянии покоя:

$$p = p_0 + \frac{m \cdot g}{A} \quad (5.8)$$

Таким образом, ожидаемый результат равен  $\gamma=7/5=1,4$ , поскольку воздух преимущественно состоит из двухатомных молекул с 5 степенями свободы для поглощения тепловой энергии.

## 6. РЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ И ТОЧКА ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА

Гексафторид серы ( $\text{SF}_6$ ) подходит для исследования свойств реальных газов, поскольку его критическая температура ( $T_c=319 \text{ K}$ ) и его критическое давление ( $p_c=37,6 \text{ бар}$ ) относительно низкие.

Устройство для определения критической точки состоит из прозрачной измерительной камеры с очень толстыми стенками, которая выдерживает высокое давление. Внутренний объем камеры может быть изменен поворотом маховика, что позволяет производить точную настройку и считывание данных с точностью до  $1/1000$  от максимального объема. Давление создается гидравлической системой с использованием масла. Гидравлическая система отделена от камеры коническим резиновым уплотнением, которое сворачивается при изменении объема. Такая конструкция гарантирует, что перепад давления между измерительной камерой и масляным резервуаром практически ничтожен. Таким образом, вместо прямого измерения давления газа манометр измеряет давление масла, что позволяет избежать мертвого объема в газовом пространстве.

Измерительная камера заключена в прозрачную водяную баню. Во время эксперимента термостатическая водяная баня поддерживает точно контролируемую и регулируемую постоянную температуру, которая измеряется цифровым термометром.

Давление как функция объема измеряется точка за точкой при постоянной температуре, и результаты отображаются в виде  $p$ - $V$ -диаграммы (рис. 6.1). Сразу видно отклонение от поведения идеального газа. Горизонтальные участки диаграммы обведены бинодальной кривой. Вершина этой кривой соответствует критической точке.

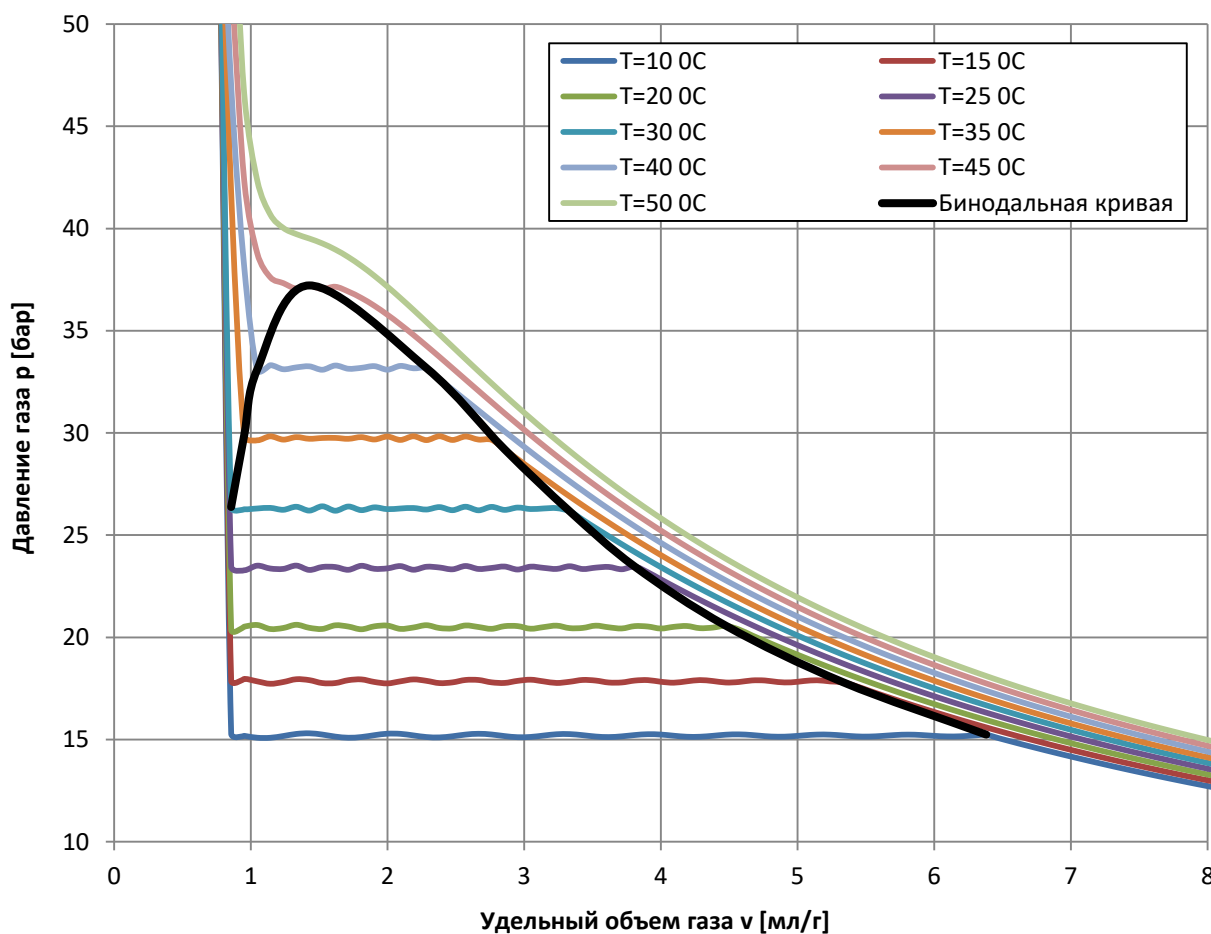


Рис. 6.1 –  $p$ - $V$  диаграмма гексафторида серы

## 7. КУБ ЛЕСЛИ

Интенсивность излучения поверхности тела описывается коэффициентом излучения  $E$ . Поглощающая способность  $A$  – это соотношение между интенсивностью поглощенного и падающего излучения. Поглощающая способность увеличивается с коэффициентом излучения. Более конкретно, согласно закону Кирхгофа, соотношение между излучательной способностью и поглощательной способностью одинаково для всех тел при данной температуре и соответствует излучательной способности  $E_{\text{св}}$  черного тела при этой температуре:

$$\frac{E(T)}{A} = E_{\text{св}}(T) = \sigma \cdot T^4 \quad (7.1)$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана,  $T$  – температура в Кельвинах.

Степень, в которой впитывающая способность зависит от температуры, обычно незначительна. Следовательно, излучательную способность тела можно описать как

$$E(T) = A \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (7.2)$$

Если тело имеет ту же температуру  $T_0$ , что и окружающая его среда, интенсивность тепла, излучаемого телом в окружающую среду, равна интенсивности тепла, которое оно поглощает:

$$E(T_0) = A \cdot \sigma \cdot T_0^4 \quad (7.3)$$

Если температура тела выше, интенсивность излучения, поглощаемого из окружающей среды, не меняется до тех пор, пока температура окружающей среды остается постоянной. Энергия, излучаемая телом на единицу поверхности и времени и измеряемая с помощью детектора излучения, равна

$$\Delta E(T) = A \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_0^4) \quad (7.4)$$

В этой лабораторной работе куб Лесли, оснащенный одной белой, одной черной, одной матовой и одной блестящей поверхностью, нагревается за счет заполнения его водой, нагретой до 100 °С. Затем определяется интенсивность излучения путем относительного измерения с помощью термоэлектрического элемента Молля. Измеренные значения для четырех различных поверхностей отслеживаются на протяжении всего процесса охлаждения до комнатной температуры.

Строится график зависимости показаний напряжения от величины  $x = T^4 - T_0^4$ , дающий четыре прямых линии, которые проходят через начало координат и имеют наклоны, соответствующие поглощающей способности каждой поверхности (рис. 7.1).

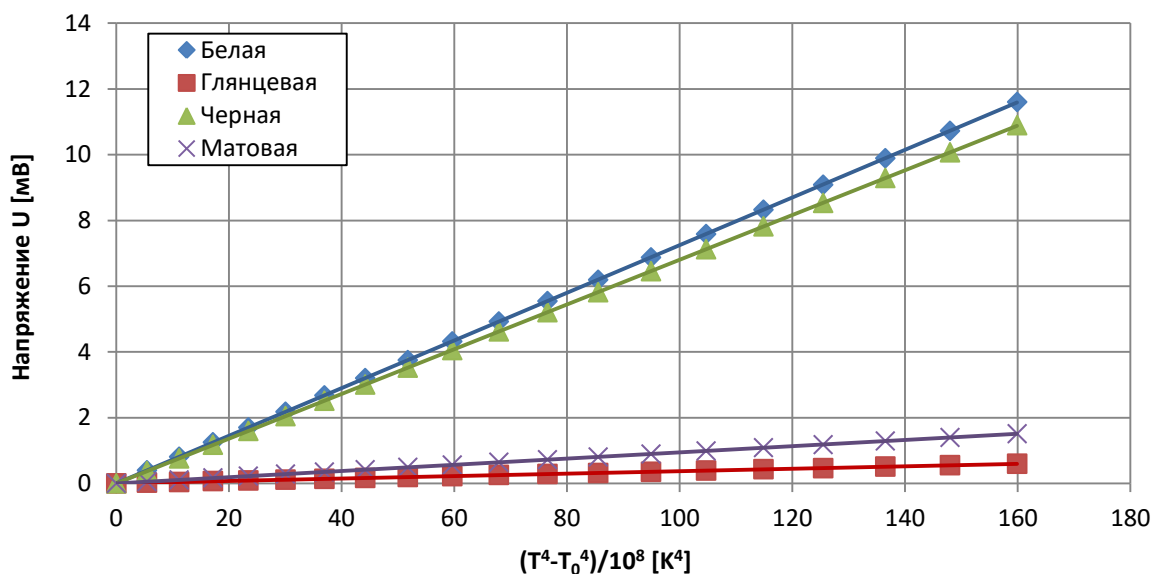


Рис. 7.1 – Зависимость:  $U - (T^4 - T_0^4)$  для различных сторон куба Лесли

## 8. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

В металлическом стержне с площадью поперечного сечения  $A$ , концы которого имеют различную температуру, через некоторое время по длине возникает температурный градиент, в результате чего температура равномерно снижается от горячего к холодному концу. За период времени  $dt$  через поперечное сечение стержня проходит количество тепла  $dQ$ , и возникает постоянный тепловой поток  $P_Q$  (рис. 8.1-8.2):

$$P_Q = \frac{dQ}{dt} = \lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (8.1)$$

где  $P_Q$  – тепловой поток,  $A$  – площадь поперечного сечения,  $\lambda$  – теплопроводность материала стержня,  $T$  – температура,  $x$  – координата по длине стержня.

Для установившегося режима применяется следующая зависимость:

$$\lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(x, t) - c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t}(x, t) = 0 \quad (8.2)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость,  $\rho$  – плотность материала стержня.

В установившемся режиме состояние согласуется с уравнением 8.1:

$$\frac{\partial T}{\partial t}(x, t) = 0 \quad \text{и} \quad \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x}(x, t) = \text{const} = \frac{P_Q}{A} \quad (8.3)$$

Электронно-регулируемый нагреватель подает на стержень количество тепла, которое можно определить путем измерения напряжения нагревателя  $U$  и тока  $I$ :

$$P_{el} = U \cdot I \quad (8.4)$$

Электронное регулирование тока гарантирует, что первый конец стержня быстро достигает температуры около  $90^\circ\text{C}$ , а затем эта температура поддерживается постоянной.

На другом конце стержня поддерживается температура таяния льда, что позволяет применить калориметрический метод.

Изолирующая оболочка вокруг стержня сводит к минимуму потери тепла в окружающую среду и обеспечивает более линейный температурный профиль в установившемся режиме. С помощью электронного термометра температура измеряется в заранее определенных точках вдоль стержня. Исследуются как медный, так и алюминиевый стержень.

Поток тепла  $P_Q$  соответствует электрической мощности  $P_{el}$  за вычетом небольшого количества мощности, рассеиваемой из-за потерь  $P_Q = P_{el} - P_l$ .

Следовательно,

$$\lambda = \frac{P_{el} - P_l}{A} \cdot \frac{L}{T(0) - T(L)} \quad (8.5)$$

где  $L$  – расстояние между выбранными точками измерения температуры.

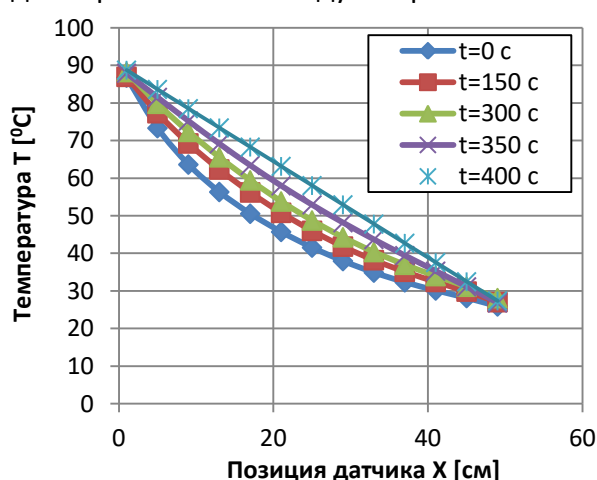


Рис. 8.1 – Зависимость: Температура–Положение датчика (T-X) на различных этапах нагрева стержня

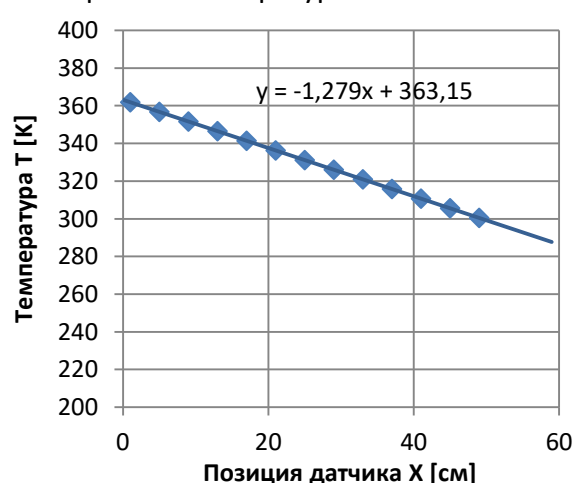


Рис. 8.2 – Зависимость: Температура–Положение датчика (T-X) при стационарном режиме нагрева стержня



## 9. ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Коэффициент линейного температурного расширения материала определяется как:

$$\alpha = \frac{1}{L(T)} \cdot \frac{dL}{dT} \quad (9.1)$$

где  $L$  – длина стержня,  $T$  – температура  $^{\circ}\text{C}$ .

Этот коэффициент сильно зависит от природы материала и обычно менее чувствителен к температуре. Это приводит к следующему уравнению:

$$L(T) = L_0 \cdot \exp(\alpha \cdot T) \quad (9.2)$$

где  $L_0$  – длина стержня при отсутствии перепада температуры.

Если температура не очень высокая:

$$L(T) = L_0 \cdot (1 + \alpha \cdot T) \quad (9.3)$$

В этой лабораторной работе измерения проводятся на тонких трубках из латуни, стали и стекла, через которые пропускается горячая вода для повышения их температуры. Циркуляционный термостат используется для поддержания постоянной температуры воды. Один конец трубки прикреплен индикатору часового типа для определения увеличения длины стержня в результате теплового расширения.

В исследуемом диапазоне температур  $\alpha \cdot T \ll 1$ .

Уравнение 9.3 может быть изменено:

$$\Delta L = L(T_1) \cdot \alpha \cdot \Delta T; \quad \Delta T = T_2 - T_1 \quad (9.4)$$

где  $L(T_1)$  – начальная длина стержня.

Искомые коэффициенты линейного расширения можно определить по наклону прямых, проходящих через начало координат (рис. 9.1).

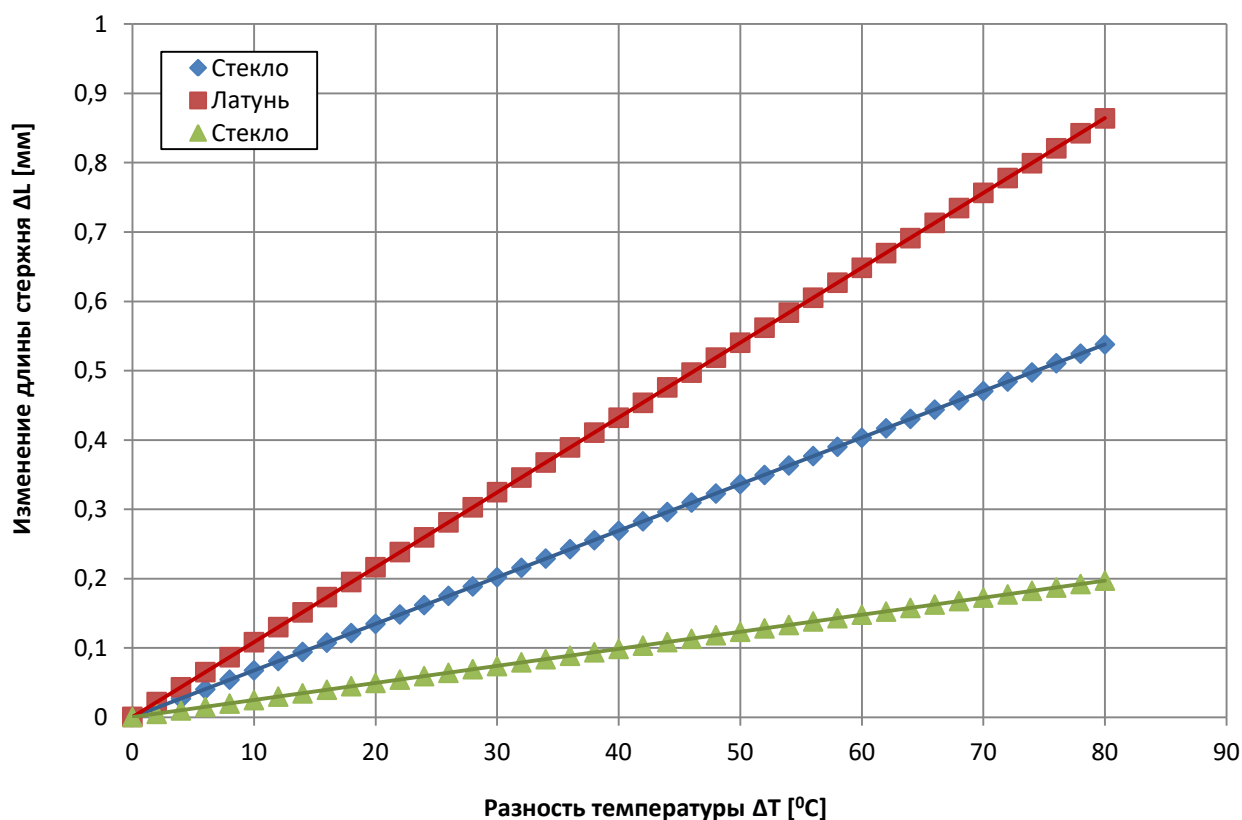


Рис. 9.1 – Зависимость: Изменение длины стержня–Разность температур ( $\Delta L$ -  $\Delta T$ ) для различных материалов стержня

## 10. АНОМАЛИЯ ВОДЫ

В лабораторных условиях исследуется расширение воды в сосуде с вертикальной трубкой. Высота  $h$ , на которую вода поднимается по трубке, измеряется как функция температуры воды  $T$ . Если не учитывать тот факт, что стеклянный сосуд также расширяется при более высоких температурах, общий объем воды в сосуде и в трубке определяется как:

$$V(T) = V_0 + \pi \frac{d^2}{4} \cdot h(T) \quad (10.1)$$

где  $d$  – внутренний диаметр трубки,  $V_0$  – объем сосуда.

Если принять во внимание расширение материала емкости:

$$V(T) = V_0 \cdot (1 + 3 \cdot \alpha \cdot T) + \pi \frac{d^2}{4} \cdot h(T) \quad (10.2)$$

где  $\alpha = 3.3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  – коэффициент линейного расширения стекла.

Относительная плотность воды определяется из уравнений 10.1 и 10.2 следующим образом:

$$\frac{\rho(T)}{\rho(0^\circ\text{C})} = \frac{V_0 + \pi \frac{d^2}{4} h(0^\circ\text{C})}{V_0 \cdot (1 + 3 \cdot \alpha \cdot T) + \pi \frac{d^2}{4} h(T)} \quad (10.3)$$

Максимум для этого выражения находится при  $T = 3,9^\circ\text{C}$ .

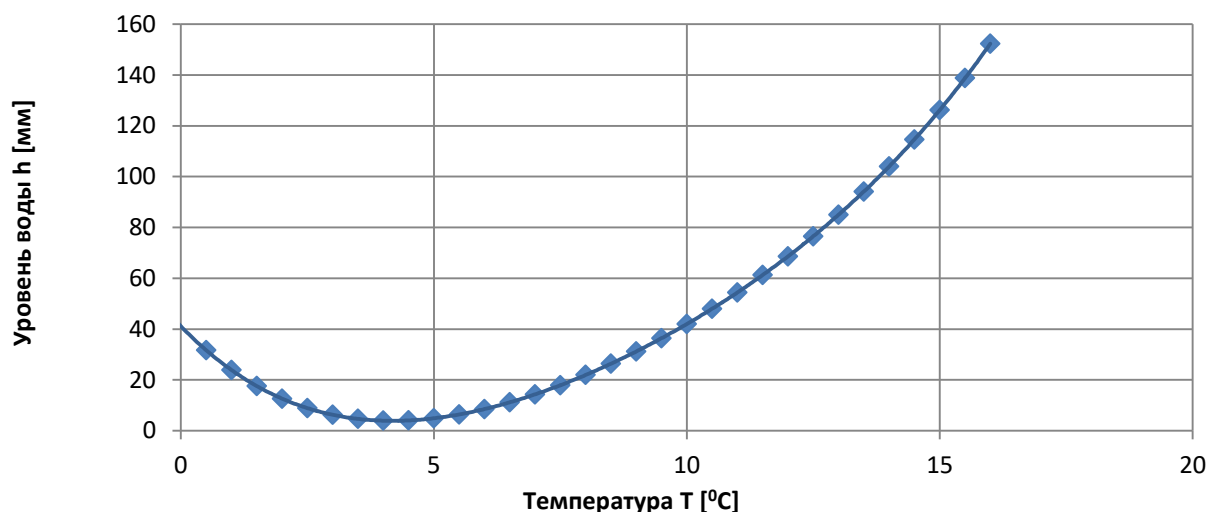


Рис. 10.1 – Зависимость: Уровень воды в трубке–Температура ( $h$ - $T$ )

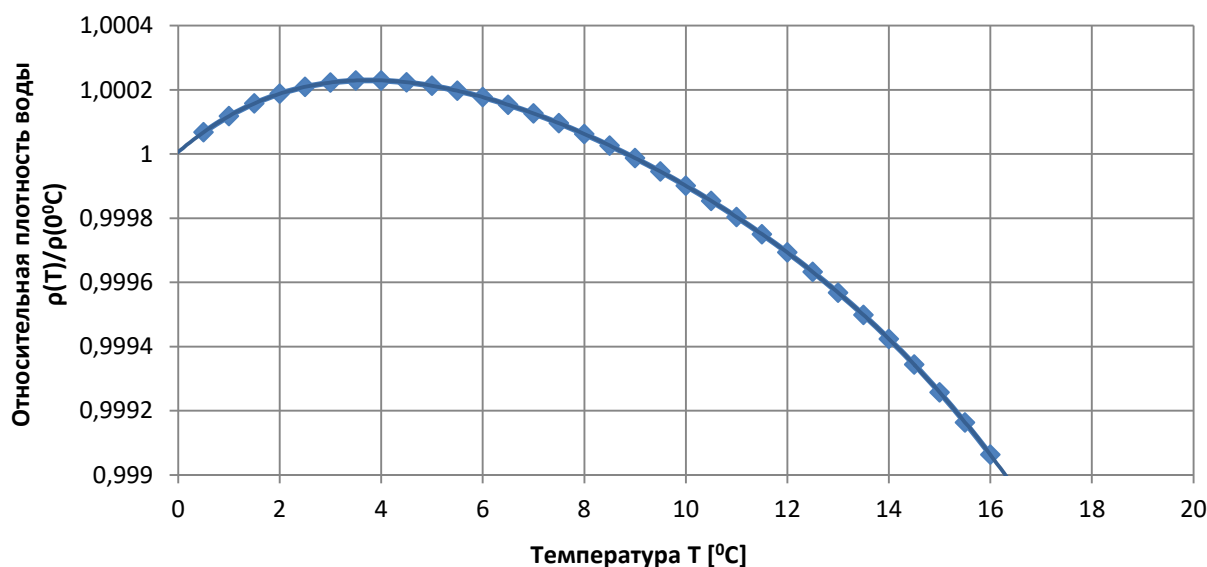


Рис. 10.2 – Зависимость: Относительная плотность воды–Температура ( $\rho(T)/\rho[0^\circ\text{C}]-T$ )

## 11. ДВИГАТЕЛЬ СТИРЛИНГА МОДЕЛИ D

Если тепловой двигатель работает без какой-либо механической нагрузки, он вращается на холостом ходу, который ограничен внутренним трением и зависит от количества подаваемой тепловой энергии. Цикл двигателя Стирлинга (рис. 11.1) включает следующие этапы.

**Нагрев:** тепло вводится, когда поршень вытеснения выдвигается, выталкивая воздух в нагретую область большого цилиндра. Во время этой операции рабочий поршень находится в своей нижней точке, поскольку поршень вытеснения опережает рабочий поршень на  $90^\circ$ .

**Расширение:** нагретый воздух расширяется и заставляет рабочий поршень втягиваться. В то же время механическая работа передается на шток маховика через коленчатый вал.

**Охлаждение:** когда рабочий поршень находится в своей верхней точке, поршень вытеснения втягивается, и воздух перемещается к верхнему концу большого цилиндра для охлаждения.

**Сжатие:** охлажденный воздух сжимается за счет выдвижения рабочего поршня. Необходимая для этого механическая работа обеспечивается штоком маховика.

Если рассматривать постоянным внутреннее трение, частота вращения холостого хода пропорциональна механической энергии, выделяемой двигателем Стирлинга в ненагруженном состоянии. Если, кроме того, сопротивление нагревателя предполагается постоянным, то энергия нагрева пропорциональна квадрату напряжения нагревателя. Таким образом, на рис. 11.2 частота вращения холостого хода  $n$  двигателя Стирлинга (как мера выходной механической энергии) представлена как функция квадрата напряжения нагревателя  $U$  (как мера подводимой тепловой энергии).

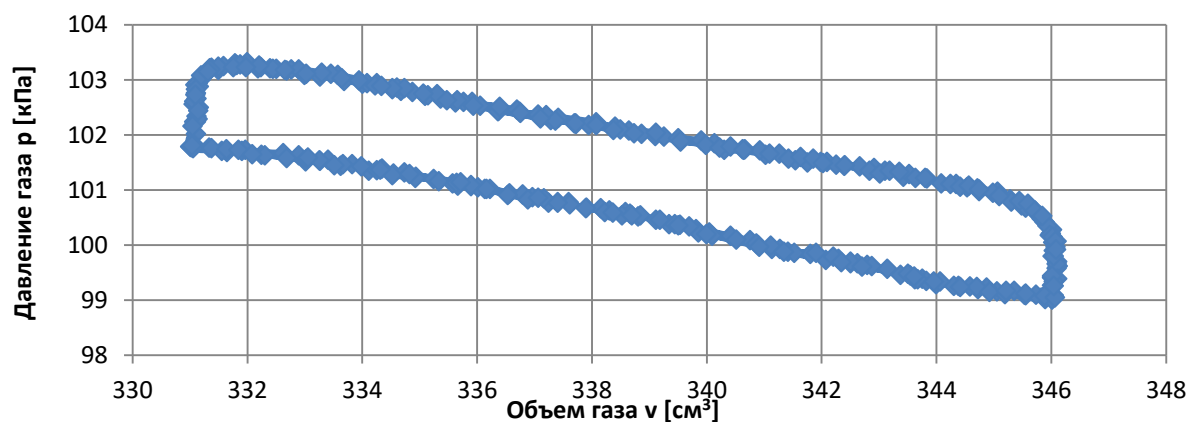


Рис. 11.1 –  $p$ - $V$  диаграмма двигателя Стирлинга модели D

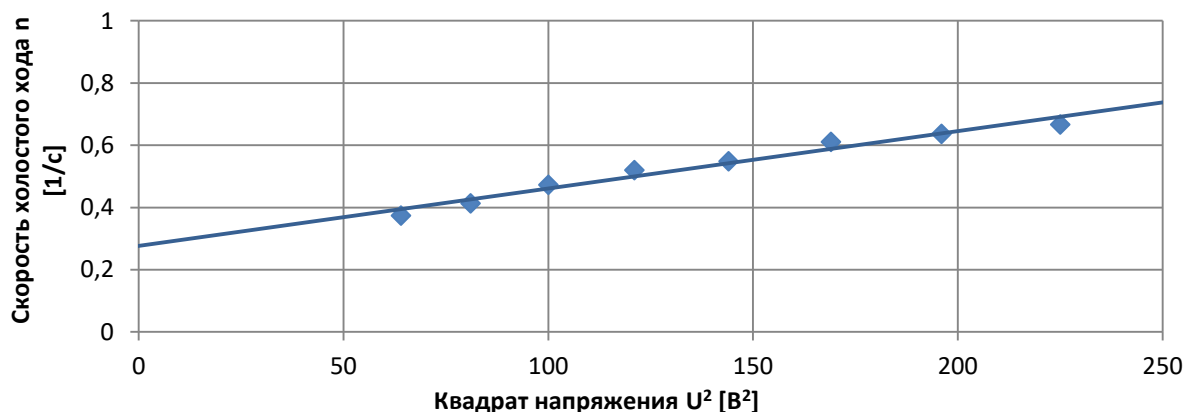


Рис. 11.2 – Зависимость: Скорость холостого хода–Квадрат напряжения ( $n$ - $U^2$ )

## 12. ДВИГАТЕЛЬ СТИРЛИНГА МОДЕЛИ G

Циклические процессы в термодинамике представляются в виде замкнутого цикла на  $p$ - $V$  диаграмме (рис. 12.1). Площадь, ограниченная кривой, соответствует механической работе  $W$ , совершенной системой. В качестве альтернативы может быть определена механическая мощность  $P$ , связанная с полным циклом, а затем механическая работа может быть рассчитана на основе этой мощности путем интегрирования по времени.

Применяются следующие уравнения:

$$W = \oint_V p \cdot dV \quad (12.1)$$

или

$$W = \int_{t_1}^{t_2} P \cdot dt; \quad P(t) = p \frac{dV}{dt} \quad (12.2)$$

Для определения давления  $p$  в главном цилиндре двигателя установлен датчик относительного давления, который измеряет перепад давления в цилиндре относительно давления окружающей среды. Объем  $V$  рассчитывается на основе расстояния  $s$ , пройденного основным поршнем, и его площади поперечного сечения  $A$ . Для этого к основному поршню прикреплен датчик перемещения.

Для проверки цикличности процесса результаты измерений наносятся на диаграмму  $p$ - $V$ . Для определения механической производительности во время выполнения работы строится дополнительный график, показывающий изменение давления и объема во времени, наглядно иллюстрирующий технологические циклы двигателя. Это важно при выборе пределов интегрирования для расчета механической работы за цикл.

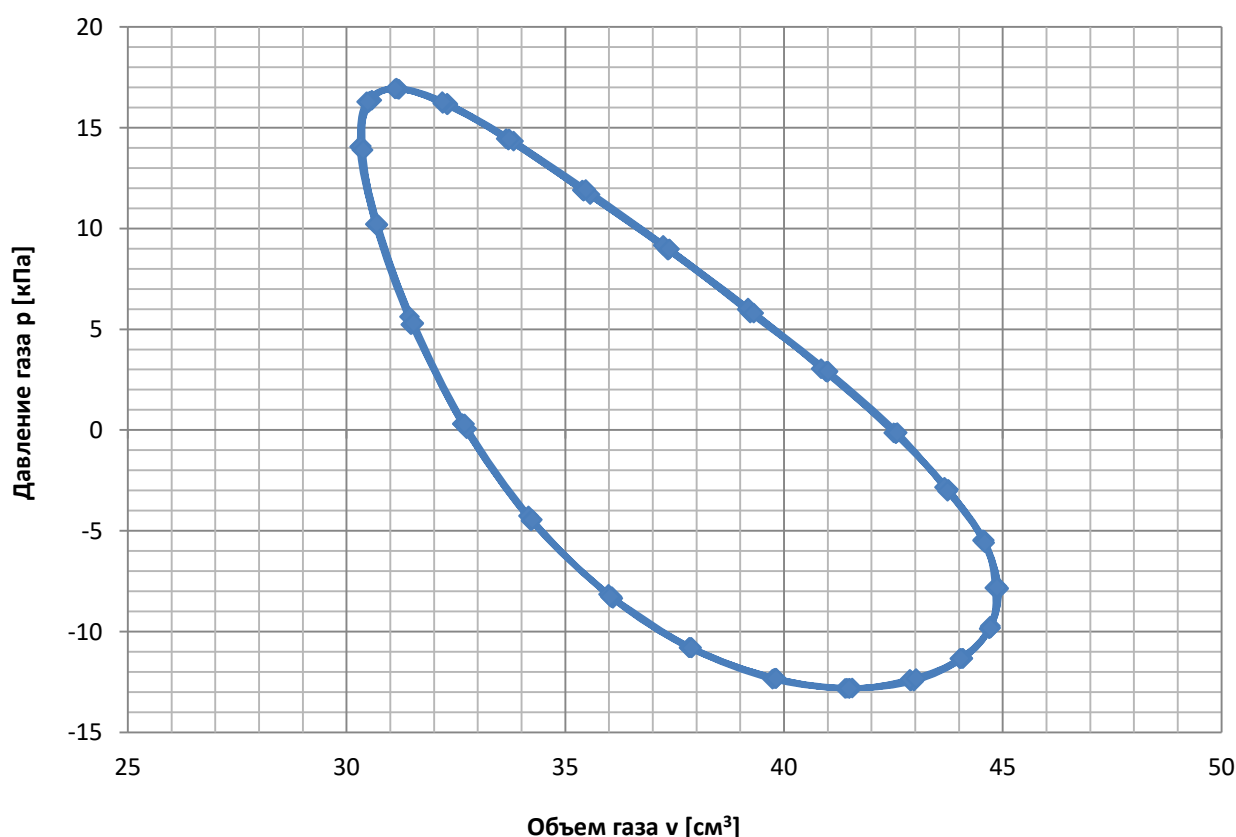


Рис. 12.1 –  $p$ - $V$  диаграмма двигателя Стирлинга модели G

### 13. ТЕПЛОВЫЕ НАСОСЫ

Электрический компрессионный тепловой насос состоит из компрессора с электроприводом, конденсатора, расширительного клапана и испарителя. Его работа основана на циклическом процессе – фазовом переходе, которому подвергается рабочая среда внутри насоса. В идеале этот процесс можно разделить на четыре стадии, включая сжатие, сжижение, сброс давления и испарение.

Для компрессионной части цикла газообразная рабочая жидкость всасывается компрессором и сжимается без какого-либо изменения энтропии ( $s_1=s_2$ ) от  $p_1$  до  $p_2$ , в то время как среда нагревается. Соответственно, температура повышается от  $T_1$  до  $T_2$ . Работа механического сжатия, произведенная на единицу массы, равна  $\Delta w=h_2-h_1$ .

Внутри конденсатора рабочее тело значительно охлаждается и конденсируется. Выделившееся в результате тепло (избыточное тепло и скрытая теплота конденсации) на единицу массы равно  $\Delta q_2=h_2-h_3$ . Температура окружающего резервуара при этом повышается.

Конденсированная среда достигает выпускного клапана, где давление сбрасывается (без какой-либо механической работы). В этом процессе температура также снижается из-за работы, которая должна выполняться против молекулярных сил притяжения внутри рабочего тела (эффект Джоуля-Томсона). Энтальпия остается постоянной ( $h_4=h_3$ ).

Поглощая тепло внутри испарителя, рабочая жидкость полностью испаряется. Это охлаждает окружающий резервуар. Тепло, поглощаемое единицей массы:  $\Delta q_1=h_1-h_4$ .

Диаграмма Мольте рабочего тела часто используется для представления цикла компрессионного теплового насоса. На этой диаграмме показана зависимость давления  $p$  от удельной энтальпии  $h$  рабочего тела (энтальпия является мерой теплосодержания рабочего тела и обычно увеличивается с увеличением давления и содержания газа).

На диаграмме также указаны изотермы ( $T=\text{const}$ ) и изоэнтропы ( $S=\text{const}$ ), а также относительная массовая доля рабочего тела в жидкой фазе. Слева от поверхности испарения рабочая жидкость полностью конденсируется. Среда присутствует в виде перегретого пара справа от границы раздела конденсации и в виде смеси жидкости и газа между двумя линиями. Две линии соприкасаются в критической точке.

Чтобы изобразить систему на диаграмме Мольте, идеальный цикл, описанный выше, может быть определен путем измерения давления  $p_1$  и  $p_2$ , соответственно, до и после расширительного клапана, и температур  $T_1$  и  $T_3$ , соответственно, до компрессора и расширительного клапана.

Теоретическая эффективность идеального циклического процесса может быть рассчитана по удельным энтальпиям  $h_1$ ,  $h_2$  и  $h_3$ , считанным из диаграммы Мольте:

$$\eta_{th} = \frac{\Delta q_2}{\Delta w} = \frac{h_2-h_3}{h_2-h_1} \quad (13.1)$$

Определение энтальпий  $h_2$  и  $h_3$  идеального циклического процесса и количества тепла  $\Delta Q_2$ , подводимого к резервуару горячей воды за интервал времени  $\Delta t$ , позволяет оценить массовый расход рабочего тела.

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{\Delta Q_2}{\Delta t} \cdot \frac{1}{h_2-h_3} \quad (13.2)$$

К данным рекомендациям прилагается векторная диаграмма Мольте. На рисунках 13.1-13.3 показаны основные экспериментальные зависимости температуры, давления и мощности компрессора от времени.

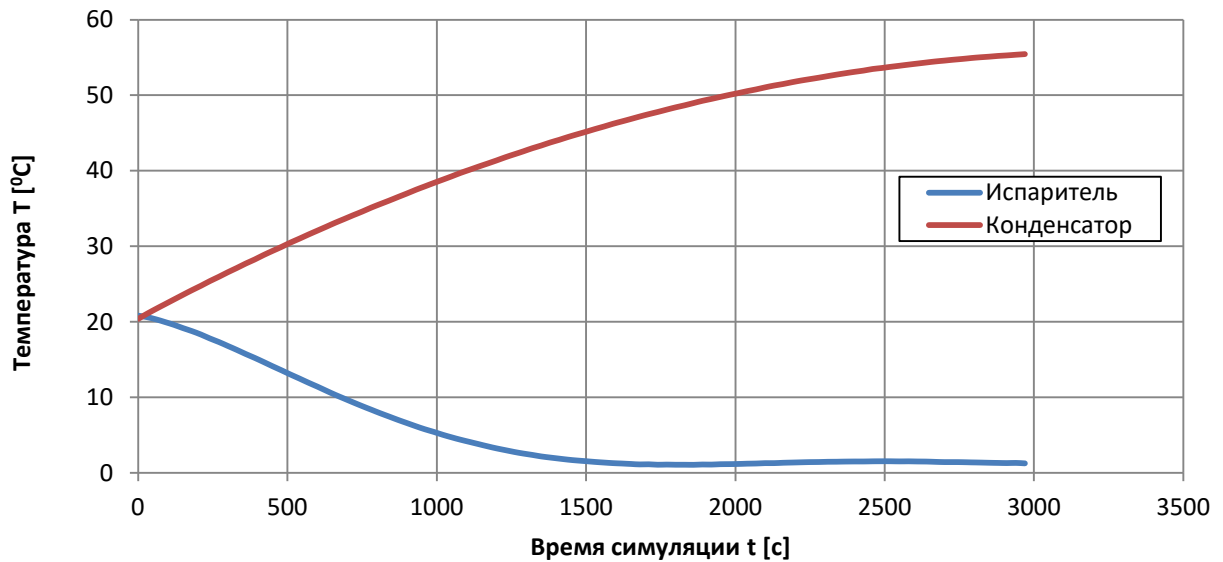


Рис. 13.1 – Зависимость: Температура–Время ( $T$ - $t$ ) для испарителя и конденсатора

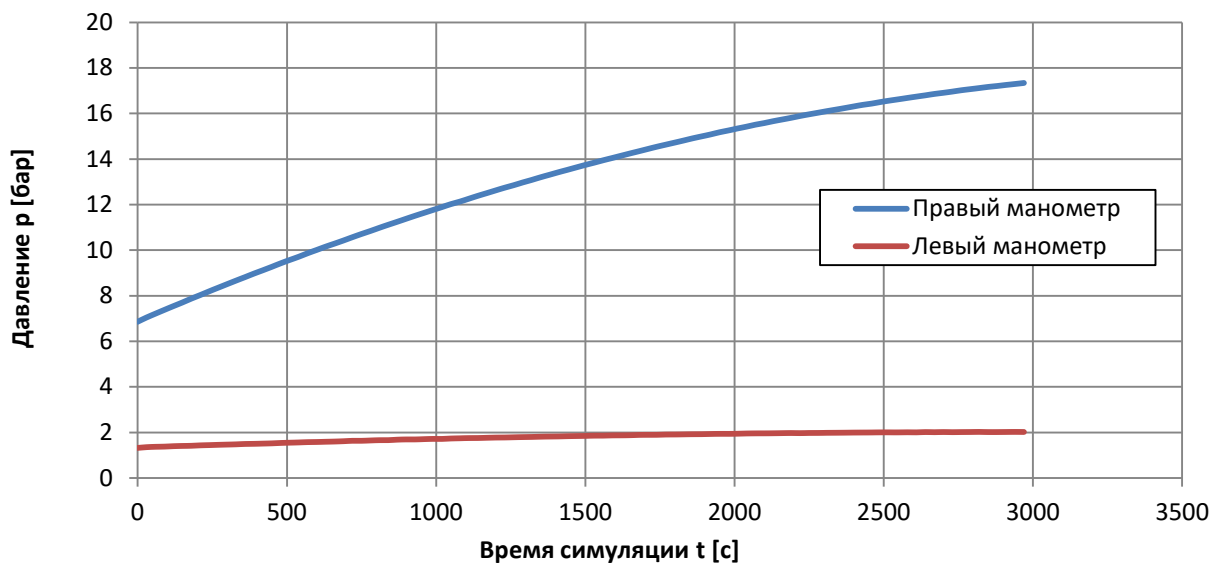


Рис. 13.2 – Зависимость: Давление–Время ( $p$ - $t$ )

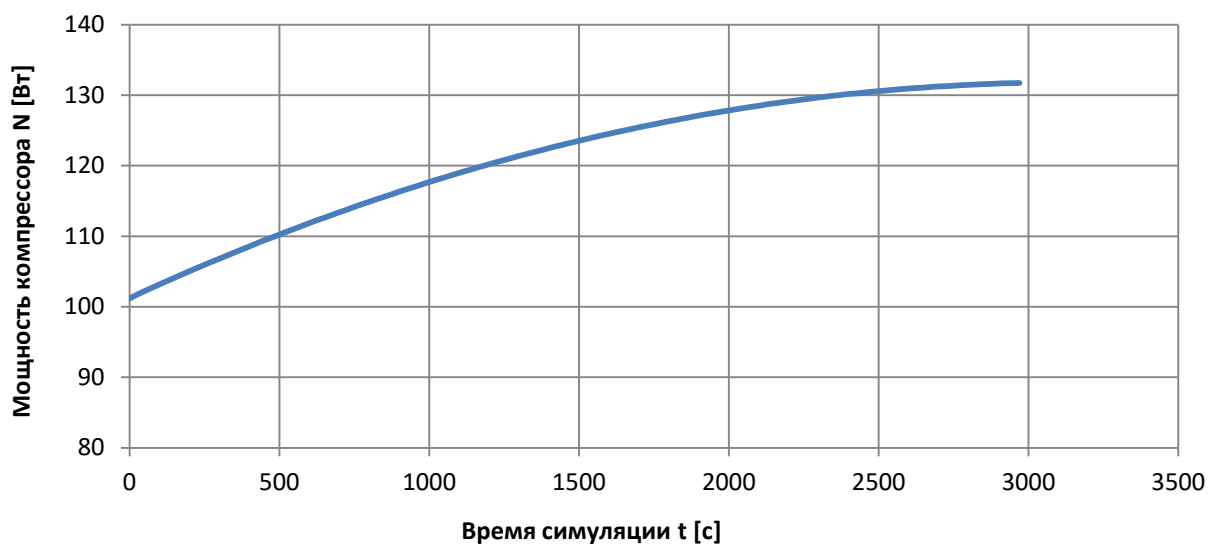


Рис. 13.3 – Зависимость: Мощность компрессора–Время ( $N$ - $t$ )

### ССЫЛКИ НА ИНФОРМАЦИОННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. <https://www.3bscientific.com> – Каталог лабораторного оборудования для проведения физико-технических экспериментов, содержащий более 135 экспериментов по всему спектру физики, от классической до современной.
2. <https://www.ld-didactic.de> – Лабораторные установки, охватывающие научные и инженерные дисциплины, методическое обеспечение и литература для студентов и преподавателей.
3. <https://phys.libretexts.org> – Онлайн-библиотека по физике LibreTexts – тексты с открытым доступом для улучшения последипломного образования на всех уровнях высшего образования.
4. [https://en.wikipedia.org/wiki/Internal\\_energy](https://en.wikipedia.org/wiki/Internal_energy) – «Internal energy» статья веб-ресурса Wikipedia – открытой энциклопедии.
5. [https://en.wikipedia.org/wiki/Work\\_\(thermodynamics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Work_(thermodynamics)) – «Work (thermodynamics)» статья веб-ресурса Wikipedia – открытой энциклопедии.
6. [https://en.wikipedia.org/wiki/Boyle%27s\\_law](https://en.wikipedia.org/wiki/Boyle%27s_law) – «Boyle's law» статья веб-ресурса Wikipedia – открытой энциклопедии.
7. [https://en.wikipedia.org/wiki/Gay-Lussac%27s\\_law](https://en.wikipedia.org/wiki/Gay-Lussac%27s_law) – «Gay-Lussac's law» статья веб-ресурса Wikipedia – открытой энциклопедии.
8. [https://en.wikipedia.org/wiki/Heat\\_capacity\\_ratio](https://en.wikipedia.org/wiki/Heat_capacity_ratio) – «Heat capacity ratio» статья веб-ресурса Wikipedia – открытой энциклопедии.
9. [https://en.wikipedia.org/wiki/Adiabatic\\_process](https://en.wikipedia.org/wiki/Adiabatic_process) – «Adiabatic process» статья веб-ресурса Wikipedia – открытой энциклопедии.
10. [https://en.wikipedia.org/wiki/Critical\\_point\\_\(thermodynamics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Critical_point_(thermodynamics)) – «Critical point (thermodynamics)» статья веб-ресурса Wikipedia – открытой энциклопедии.
11. [https://en.wikipedia.org/wiki/Leslie\\_cube](https://en.wikipedia.org/wiki/Leslie_cube) – «Leslie cube» статья веб-ресурса Wikipedia – открытой энциклопедии.
12. [https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal\\_conduction](https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_conduction) – «Thermal conduction» статья веб-ресурса Wikipedia – открытой энциклопедии.
13. [https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal\\_expansion](https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_expansion) – «Thermal expansion» статья веб-ресурса Wikipedia – открытой энциклопедии.
14. [https://en.wikipedia.org/wiki/Properties\\_of\\_water](https://en.wikipedia.org/wiki/Properties_of_water) – «Properties of water» статья веб-ресурса Wikipedia – открытой энциклопедии.
15. [https://en.wikipedia.org/wiki/Stirling\\_engine](https://en.wikipedia.org/wiki/Stirling_engine) – «Stirling engine» статья веб-ресурса Wikipedia – открытой энциклопедии.
16. [https://en.wikipedia.org/wiki/Heat\\_pump](https://en.wikipedia.org/wiki/Heat_pump) – «Heat pump» статья веб-ресурса Wikipedia – открытой энциклопедии.
17. <https://www.physicsclassroom.com> – большая коллекция интерактивных физических симуляций HTML-5 для планшетов iPad и Chromebook, наполненная упражнениями для развития навыков, физическими симуляциями и игровыми задачами.