

### Лаб. 2.4.1 (не окончательный вариант)

Изучение фазового перехода между жидкостью и газом.

Цель работы – получение изотерм с фазовым переходом между жидкостью и газом при разных температурах и определение критических параметров.

Оборудование. Герметичное устройство, позволяющее контролируемо изменять объем и температуру и наблюдать за фазовым переходом. Термостат. Термометр.

Содержание

Введение

Свойства шестифтористой серы  $\text{SF}_6$

Экспериментальная часть

Описание установки

Определение изотерм шестифтористой серы  $\text{SF}_6$

Порядок выполнения работы

Дополнительное задание.

Определение молярной теплоты испарения шестифтористой серы  $\text{SF}_6$

Приложение 1

Калибровка нуля

Приложение 2

Наполнение измерительной ячейки  $\text{SF}_6$  газом.

Приложение 3

Определение массы  $\text{SF}_6$ , находящегося в измерительной ячейки

Литература

Введение

Термодинамическая фаза — гомогенная (однородная) часть системы, характеризующаяся собственным уравнением состояния.

Гетерогенная система – неоднородная система, состоящая из однородных частей (термодинамических фаз) разделенных поверхностью раздела. При переходе через поверхность раздела хотя бы одно термодинамическое свойство вещества изменяется скачком<sup>[1]</sup>. Часто (но не всегда) поверхность раздела является видимой. В данной работе рассматривается двухфазная система, состоящая из жидкости и газа и фазовый переход между ними.

В идеальном газе между столкновениями молекулы движутся свободно, т.е. не учитывается взаимодействие между ними. Поэтому уравнение состояния для идеального газа:

$$pV = \nu RT$$

не описывает фазовый переход. Здесь  $p$  – давление,  $V$  – объем,  $\nu$  – количество молей,  $T$  – температура.

Взаимодействие между молекулами учтено в уравнении Ван-дер-Ваальса:

$$p = \frac{\nu RT}{V - b\nu} - \frac{a\nu^2}{V^2} \quad (1)$$

При приближении молекулы отталкиваются. Это учитывается коэффициентом  $b$ . При удалении возникает сила притяжения. Это учитывается коэффициентом  $a$ . Рассмотрим изотермы Ван-дер-Ваальса (рис. 1). Удобно перейти от объема к удельному объему, т.е. отношению объема к массе вещества. Это всегда можно сделать учитывая, что количество молей равно отношению массы вещества к его молярной массе. Изотерма дает зависимость давления от объема (в нашем случае от удельного объема) при постоянной температуре. В общем случае на этой изотерме должны быть области, где система находится в жидком, газообразном и в двухфазном состоянии (на рис.1 изотермы, соответствующие температурам 10-40°C). Не трудно видеть, что при заданном давлении изотерма Ван-дер-Ваальса является кубическим уравнением относительно удельного объема. Таким образом при заданном давлении существует три решения. Однако не всегда все решения являются действительными числами. На рис. 2 показана изотерма Ван-дер-Ваальса для случая, когда есть диапазон давлений, в котором имеются три действительных решения. При низких давлениях имеется одно действительно решение, при этом, удельный объем большой, что соответствует однофазному, газовому состоянию вещества. При высоких давлениях также имеется одно решение, при этом, удельный объем маленький, что соответствует однофазному, жидкому состоянию вещества. Очевидно,

что область давлений, где имеется три действительных решения соответствует двухфазному состоянию вещества.

Отметим, что уравнение состояния применимо для случая, когда система находится в термодинамически равновесном состоянии. Причем, это равновесие является устойчивым, так как термодинамические системы, вследствие теплового движения, всегда испытывает случайные флуктуации, которые делают невозможным её нахождение в неустойчивом равновесии.

Рассмотрим двухфазную систему, состоящую из жидкости и ее пара. В этом случае возникает вопрос о межфазном равновесии. В случае межфазного равновесия усреднённая масса газа и жидкости не должны изменяться (система находится в замкнутом объеме). Это справедливо, когда усреднённый поток молекул из жидкости в газовую фазу равен обратному усреднённому потоку. При межфазном равновесии давление газа и жидкости, также, как и их температура, на границе раздела должны быть одинаковыми (в поле тяжести Земли давление зависит от высоты). В противном случае на границе возникает не скомпенсированная сила, либо тепловой поток (из-за градиента температуры). Равновесное давление газа называется давлением насыщенного пара. Очевидно, что давление насыщенного пара не должно зависеть от объема жидкости и газа, а зависит только от температуры.

Пусть система первоначально находилась в газообразном состоянии и квазиравновесно (так медленно, что в каждый момент времени можно считать, что в ней успевает устанавливаться равновесие) ее объем (а значит и удельный объем) начал уменьшаться. Давление, при этом, возрастает (рис. 2), а расстояние между молекулами уменьшается. В конце концов, при определённом удельном объеме вследствие взаимодействия между молекулами становится возможным фазовый переход (химические потенциалы жидкости и газа сравниваются). Далее возможно два случая (1 и 2 на рис. 2). Система может по-прежнему находиться в газообразном состоянии и давление газа будет возрастать с уменьшением объема (2 на рис. 2). Это может происходить вследствие того, что при конденсации выделяется энергия и молекулы, которые начинают образовывать капли жидкости обладают большой кинетической энергией. Если эту энергию вовремя “не снять”, то молекулы разлетятся и фазовый переход не произойдет. Если же конденсация произойдет, то при дальнейшем уменьшении объема давление должно оставаться постоянным, так как давления насыщенного пара

зависит только от температуры, а температура при изотермическом процессе постоянна (1, рис. 2). Т. е. при наличии двух фаз процесс будет не только изотермическим, но и изобарическим. При уменьшении объема масса жидкости будет возрастать, а газа - уменьшаться. Пока, в конце концов, весь газ не перейдет в жидкость, и далее давление будет сильно зависеть от объема. Если реализуется первый случай (2 на рис. 2), то по мере уменьшения объема газа, вероятность образования жидкой фазы возрастает и рано или поздно произойдет фазовый переход, давление уменьшится до давления насыщенного пара, соответствующего заданной температуре (3 на рис. 2). При дальнейшем уменьшении объема давление не будет изменяться, т.е. система перейдет на изобару. Аналогичные рассуждения можно привести для случая, если первоначально система находилась в жидком состоянии и ее объем квазиравновесно увеличивается. Таким образом, очевидно, что уравнение Ван-дер-Ваальса неправильно описывает фазовый переход. На изотерме Ван-дер-Ваальса нет изобарического участка.

С ростом температуры изотермы смещаются вверх, как показано на рис. 1. Область объемов, помеченная на рис. квадратами, где наблюдаются одновременно две фазы сужается, и в конце концов вырождается. Три действительных решения стремятся к одному. Соответствующие этому решению удельный объем, температура и давление называют критическими и соответствуют максимуму на кривой, огибающей область, где одновременно наблюдаются жидкости и ее пары. При дальнейшем повышении температуры жидкое и газообразные состояния становятся не различимыми. Найдем критические значения объема, температура и давления. Уравнение (1) можно записать в виде кубического уравнения относительно объема:

$$V^3 - \left(bv + \frac{vRT}{p}\right)V^2 + \frac{av^2}{p}V - \frac{bav^3}{p} = 0$$

С другой стороны, при критических условиях три решения совпадают, поэтому:

$$V^3 - 3V_{cr}V^2 + 3VV_{cr}^2 - V_{cr}^3 = 0$$

Приравниваем соответствующие коэффициенты:

$$3V_{cr} = bv + \frac{vRT_{cr}}{p_{cr}}$$

$$3V_{cr}^2 = \frac{av^2}{p_{cr}}$$

$$V_{cr}^3 = \frac{bav^3}{p_{cr}}$$

Получаем связь коэффициентов  $a$  и  $b$  с критическими значениями объема, давления и температуры:

$$b = \frac{V_{cr}}{3v} (2)$$

$$a = \frac{3V_{cr}^2 p_{cr}}{v^2}$$

$$T_{cr} = \frac{8V_{cr} p_{cr}}{3vR}$$

Отметим, что коэффициенты  $a$  и  $b$  можно получить и приравнявая к нулю производные  $\frac{dp}{dv}$  и  $\frac{d^2p}{dv^2}$ .

Подставляем в (1)  $a$ ,  $b$  и  $T_{cr}$ , получаем:

$$p = \frac{3vRTT_{cr}}{(3V - V_{cr})T_{cr}} - \frac{3p_{cr}V_{cr}^2}{V^2} = \frac{8TV_{cr}p_{cr}}{(3V - V_{cr})T_{cr}} - \frac{3p_{cr}V_{cr}^2}{V^2}$$

Сделаем замену переменных:

$$\bar{p} = \frac{p}{p_{cr}}, \bar{T} = \frac{T}{T_{cr}}, \bar{V} = \frac{V}{V_{cr}}$$

С учетом этого уравнение Ван-дер-Ваальса принимает простой вид:

$$\bar{p} = \frac{8\bar{T}}{(3\bar{V} - 1)} - \frac{3}{\bar{V}^2}$$

Так как коэффициент  $b$  не зависит от числа молей вещества, то согласно (2) критический объем пропорционален числу молей. Количество вещества может изменяться от опыта к опыту, поэтому удобно определять не критический объем, а критический удельный объем (отношение объема к массе или количество молей вещества).

Свойства шестифтористой серы  $SF_6$

Шестифтористая сера  $SF_6$  (эль газ) хорошо подходит для исследования фазового перехода и нахождения критических точек поскольку ее критическая температура и давление относительно низкие.

**Шестифтористая сера**

Критическая температура:	318,6 К (45,5 °С)
Критическое давление:	3,76 МПа (37,6 бара)
Критический объем:	197,4 см <sup>3</sup> /моль
Критическая плотность:	0,74 г/моль

**Описание установки**

Устройство для изучения фазового перехода состоит из измерительной ячейки, которая имеет толстые прозрачные стенки, выдерживающие высокое давление. Внутренний объем измерительной ячейки можно изменять и наблюдать за фазовым переходом. Давление в измерительной ячейке создается с помощью гидравлической системы, в которой используется касторовое масло. Термостат позволяет поддерживать постоянной температуру жидкости, циркулирующей в измерительной ячейке, которая измеряется термометром. Изображение установки приведено на рис. 3.

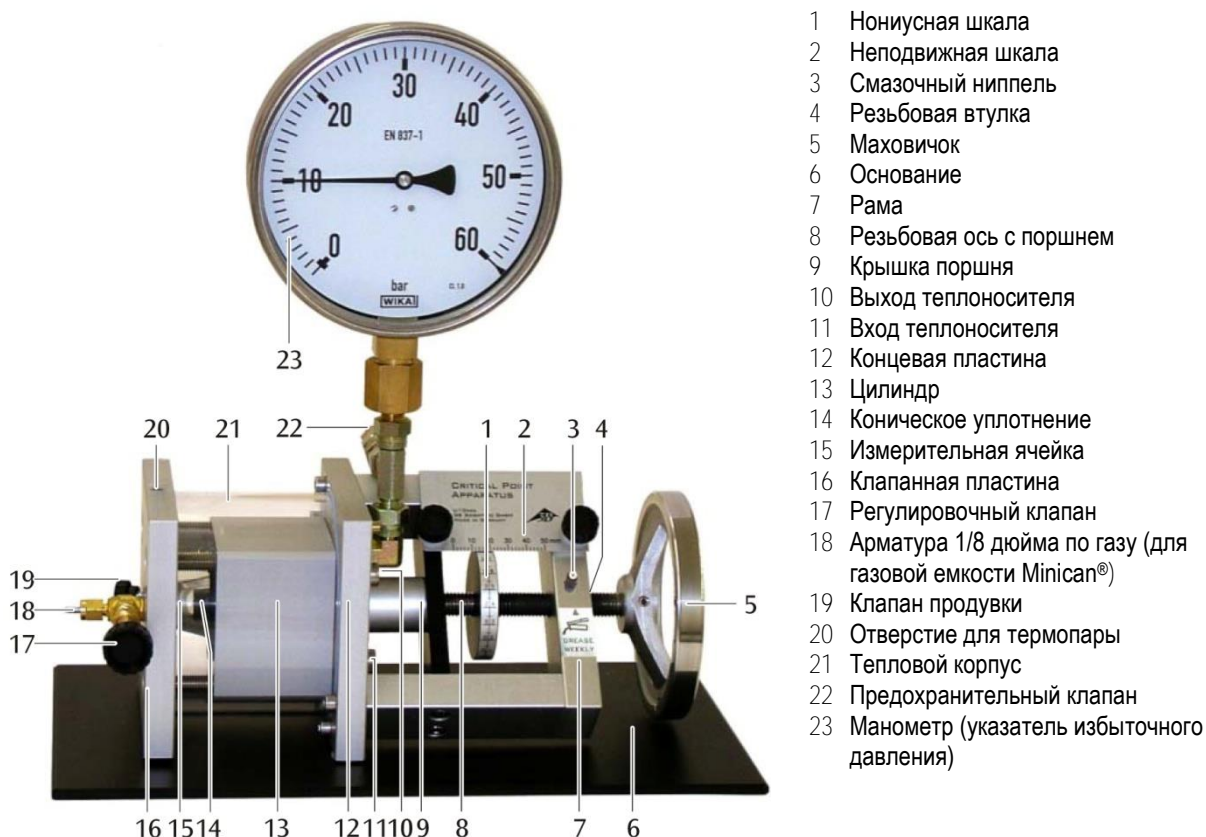


Рис. 3

Исследуемый газ через регулировочный клапан 17 поступает в измерительную ячейку 15. Его избыточное давление можно определить на манометре 23. Поршень, который находится внутри цилиндра 9 позволяет изменять объем измерительной ячейке. Поршень можно перемещать, вращая маховичек 5. Маховичек жестко соединен с резьбовой осью с поршнем 8. Положение поршня можно определить с помощью нониусной 1 и неподвижной шкалы 2. Так как нониусная шкала может перемещаться относительно резьбовой оси с поршнем 8, то необходимо ее установить (если она не установлена) так, чтобы ее положение соответствовало реальному объему измерительной ячейки. Установка сконструирована так, что изменение объема измерительной ячейке равно:

$$\Delta V = A \Delta s.$$

Где  $A=3.14 \text{ см}^2$  - площади поршня,  $\Delta s$  – перемещение поршня.

Таким образом необходимо установить нониусную шкалу относительно резьбовой оси 8 так, чтобы ноль на неподвижной шкале соответствовал нулевому реальному объему измерительной ячейки. В этом случае по координате поршня  $s$  можно определить объем измерительной ячейки следующим образом:

$$V = As \quad (3)$$

Калибровка нулю приведена в приложении 1.

#### Выполнение работы.

Прежде, чем открывать или закрывать клапана, либо вращать нониусную шкалу (см. рис 3) нужно ознакомиться с устройством установки и методикой получения результатов.

Открытие регулировочного клапана приводит к уменьшению давления эль газа в измерительной ячейке.

Вращение нониусной шкалы относительно резьбовой оси приводит к нарушению калибровки нуля. Это означает, что объем измерительной ячейки будет определяться неправильно.

*Рекомендуемые начальные условия:* при положении поршня, соответствующему значению 46 мм на неподвижной шкале, избыточное давление эль газа в измерительной ячейке должно быть порядка 10 ат.

1. Вращая маховичек установить положение поршня, соответствующее значению 46 мм на неподвижной шкале. Если давление при этом положении поршня равно или около 10 ат (изб.), то можно перейти к **пункту 4**. Другое давление может быть по двум причинам. Первая состоит в том, что часть эль газа стравилось из измерительной ячейки. Вторая – нониусная шкала была сдвинута.
2. Грубо восстановить положение нониусной шкалы можно следующим образом.

Выкручивать маховичек 5 до тех пор, пока не возникнет заметное сопротивление, если нониусная шкала мешает, то сдвинуть ее. Такое положение поршня должно соответствовать 48 мм на неподвижной шкале (рис.4). Вращая нониусную шкалу добиться этого.

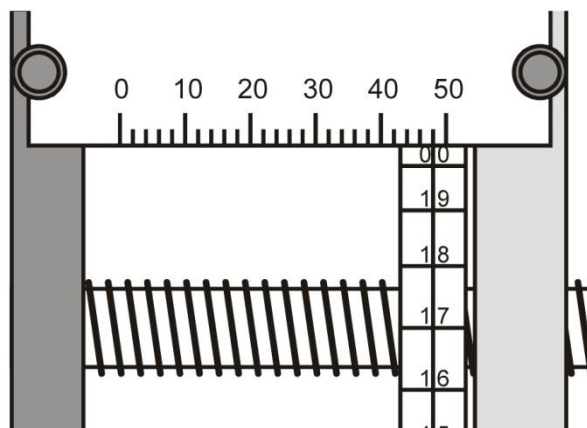


Рис. 4

Подробно методика установки нониусной шкалы описана в приложении 1.

3. Вращая маховичек 5 установить положение поршня, соответствующему значению 46 мм на неподвижной шкале и измерить давление (можно измерить и при положении поршня

48 мм, т. к. давление при смещении поршня на 2 мм изменяется незначительно). Если давление эль газа в измерительной ячейке будет меньше рекомендованного (<5 ат), то необходимо снова заполнить измерительную ячейку эль газом (см приложение 2).

После калибровки нуля по показанию на неподвижной шкале можно определить объем, занимаемый эль газом используя связь (3).

При температурах меньших критической уменьшение объема приводит к фазовому переходу из газовой фазы в жидкую. Условие перехода определяется удельным объемом, т. е. отношением объема измерительной ячейки к массе  $\text{SF}_6$ , находящемуся в этой ячейке. Масса  $\text{SF}_6$ , находящегося в этой ячейке зависит от начального давления. В связи с этим в зависимости от начального давления эль газа конденсация происходит при разных объемах измерительной ячейки. Рекомендованное начальное давления выбирается таким образом, чтобы хорошо разрешалась область, где одновременно наблюдаются две фазы. При уменьшении начального давления в два раза область, где одновременно наблюдаются две фазы, также сузится почти в два раза и это сильно затруднит определение критических параметров. Поэтому желательно, чтобы начальное давление было больше 5 ат.

#### 4. Получить изотермы при разных температурах.

- Вставить термопару в отверстие для термопары и измерить температуру. Вращая маховичек 5 установить положение поршня, соответствующее 46 мм на неподвижной шкале (можно меньше, но больше 35 мм). Уменьшая объем измерительной ячейки (например, сдвигая поршень на 1 мм) измерять давление эль газа. При быстром изменении объема может потребоваться время для того, чтобы система пришла в равновесие. Необходимо пройти всю область: от газовой до жидкой фазы.
- Включить термостат, установить на нем нужную температуру. Дождаться пока температура в измерительную ячейку перестанет изменяться. Повторить процедуру, описанную в 1. Следует обратить внимание на то, что если не уменьшать, а увеличивать объем (т.е. начинать измерения из жидкой фазы), то система в области, где наблюдаются одновременно две фазы, долго приходит в равновесие, поэтому рекомендуется вернуть поршень в исходное состояние (46 мм на неподвижной шкале) и затем уменьшать объем.

Желательно получить минимум четыре изотермы при температурах: 35, 40, 45, 50°C.

#### 5. Определить массу эль газа.

Масса эль газа для рекомендованных условиях, т. е. при избыточном давлении 10 ат при положении поршня, соответствующего 46 мм на неподвижной шкале, равна 1.05 г. Если же давление меньше рекомендованного, то массу можно определить, считая эль газ идеальным. При больших удельных объемах свойства эль газа близки к идеальному газу. Если абсолютное давление газа при неизменном объеме изменяется от  $p_n=11$  ат (10 ат, отн.) до  $p$ , то массу газа  $M$  при давлении  $p$  можно определить через массу газа  $M_{11}=1$  г при давлении  $p_n$  следующим образом:

$$M = M_{11} \frac{p}{p_n}$$

Установить положение поршня, соответствующее 46 мм на неподвижной шкале.

Измерить давление и определить массу.

Методы более точное определение массы  $\text{SF}_6$  приводятся в приложении 3.

#### 6. Построить зависимости давления от удельного объема. Определить область, где две фазы одновременно существуют. Определить критические параметры.



Дополнительное задание.

Определить молярной теплотой испарения SF<sub>6</sub>.

Уравнение Клаузиуса-Клапейрона дает связь давления насыщенного пара с температурой:

$$p = p_0 e^{\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right) \frac{q}{R}}$$

Где  $q$  - молярной теплотой испарения,  $p_0$  - давление насыщенного пара при температуре  $T_0$ .

По полученным изотермам определить давление насыщенного пара при разных температурах. Построить зависимость  $\ln(p/p_0)$  от  $(1/T_0 - 1/T)$  и по экспериментальным точкам методом наименьших квадратов провести прямую. Для SF<sub>6</sub> при  $T_0 = 209,25$  К давление  $p_0 = 0.1$  МПа. Определить молярную теплоту испарения.

Молярной теплотой испарения SF<sub>6</sub>  $q = 22$  кДж/моль [2].

Критические параметры можно определить по зависимостям  $p$  от  $T$ , полученным при постоянном удельном объеме (изохорам). Для этого надо:

- Установить объем измерительной ячейки в области существования двух фаз (рис. 1).
- Постепенно повышать температуру до  $< 50^\circ\text{C}$ . После очередного повышения температуру дождаться установления равновесия и зафиксировать давление в измерительной ячейке.
- Построить зависимость давления от температуры.

Для достижения равновесия требует до 20 минут после каждого изменения температуры. Получив изохоры при разных объемах можно также определить область существования двух фаз и определить критические параметры.

## Приложение 1

### Калибровка нуля.

Задача состоит в том, чтобы установить нониусную шкалу (рис. 3) относительно резьбовая ось с поршнем так, чтобы показания на неподвижной шкале соответствовали реальному объему измерительной ячейке.

Для этого используют тот факт, что в диапазоне давления от 1 до 50 бар, и в диапазоне температуры от 270 до 340 К, воздух ведет себя как почти идеальный газ (коэффициент сжимаемости газа отличается не более чем на 1 % от 1). Поэтому, если при неизменной температуре давление в измерительной ячейке изменяется от  $p_0$  до  $p_1$  при смещении поршня на  $\Delta s$ , то:

$$p_0(s_1 + \Delta s)A = p_1 s_1 A.$$

Где  $s_1$  – реальный объем измерительной ячейки при давлении  $p_1$ ,  $A = 3,14$  см<sup>2</sup>

Определив  $s_1$  найти реальный объем измерительной ячейки. Находим  $s_1$ :

$$s_1 = \frac{p_0}{p_1 - p_0} \Delta s \quad (1)$$

Таким образом, для того чтобы показания на неподвижной шкале соответствовали реальному объему измерительной ячейки, при положении поршня, соответствующем давлению  $p_1$  на неподвижной шкале должно быть показания равные  $s_1$ . Если это не так, то это означает, что нониусная шкала сдвинута относительно резьбовая ось с поршнем.

Используя эти выкладки можно произвести грубую калибровку.

Грубая калибровка шкал:

- Открыть регулирующий клапан (рис. 3).
- Ослабить установочный винт нониусной шкалы на пол-оборота (это дает возможность легко повернуть шкалу на резьбовой оси, не смещая маховичок).
- Выкручивать маховичок до ощущения заметного сопротивления.
- Не поворачивая маховичок, повернуть нониусную шкалу на резьбовой оси до достижения отметки 0.0 при значении на неподвижной шкале примерно 48 мм. (рис. 4)

- Ослабить винты с накатанными головками на неподвижной шкале и перемещать шкалу до тех пор, пока отметка 48 мм не окажется точно над центральной линией нониусной шкалы (рис. 4, если это необходимо).
- Затянуть винты с накатанными головками. При этом следует убедиться, что неподвижная шкала не прижимается к нониусной шкале.

#### Установка нониусной шкалы

- Закрывать регулировочный клапан (теперь давление в измерительной ячейке соответствует наружному давлению  $p_0 = 1$  бар. В пределах точности измерения манометр должен показывать избыточное давление 0 бар).
- Ввертывать маховичок, пока избыточное давление не достигнет 15 бар (абсолютное давление  $p_1 = 16$  бар).
- Определить смещение поршня  $\Delta s$ .
- Рассчитать значение положения поршня  $s_1$  по уравнению 1, соответствующее давлению 15 бар.
- Отрегулировать нониусную шкалу так, что на неподвижной шкале было значение  $s_1$ .
- Если нужно, немного повернуть маховичок наружу и закрепить нониусную шкалу установочным винтом.

#### Пример измерения

Начальное положение поршня:  $s_1 + \Delta s = 48,0$  мм давление  $p_0 = 1$  бар (абс),

Конечное положение поршня: 3,5 мм; давление 16 бар (абс)

Находим  $\Delta s = 48 - 3,5 = 44,5$  мм и  $p_1 - p_0 = 15$  бар

Из уравнения 2 получаем:  $44,5/15 = 2,97$  мм

Поэтому нониусную шкалу следует отрегулировать так, чтобы вместо значения 3,50 мм показания на неподвижной шкале были равны 2,97 мм.

## Точная калибровка

Для получения более точных изотерм нужно учесть зависимость объема измерительной ячейки от температуры и давления. Зависимость от этих параметров обусловлена изменением объема касторового масла при изменении температуры и давления. Емкость для масла также незначительно расширяется, пропорционально давлению, создаваемому пружиной в трубке манометра. Зависимость объема от температуры и давления проще всего определить используя воздух в качестве идеального газа. Запишем зависимость объема измерительной ячейки  $V_e$  от этих параметров:

$$V_e = A(s_e + s_0 + C_p p_e + C_T t_e). \quad (1)$$

Где  $p_e$  – абсолютное давление при положении поршня  $s_e$  на неподвижной шкале и температуре в  $^{\circ}\text{C}$  –  $t_e$ ,  $A = 3,14 \text{ см}^2$

Запишем уравнение состояния идеального газа:

$$\frac{p_e A(s_e + s_0 + C_p p_e + C_T t_e)}{T} - \nu R = 0$$

Где  $R = 8,314 \frac{\text{Дж}}{\text{К моль}}$ ,  $\nu$  – число молей.

Если измерить давление  $p_i$  в измерительной ячейке при разных температурах  $T = 273,15 + t_i$  и разных положениях поршня  $s_i$ , то используя метод наименьших квадратов можно определить неизвестные параметры:  $s_0$ ,  $C_p$ ,  $C_T$  и  $\nu$ . Для этого нужно найти минимум следующей функции:

$$Q = \sum_{i=1}^N \left( \frac{p_i A(s_i + s_0 + C_p p_i + C_T t_i)}{T} - \nu R \right)^2 \quad (2)$$

#### Порядок калибровки:

- Открыть регулирующий клапан (рис. 3).
- Переместить поршень, выкручивая маховичок до достижения положения, соответствующего значению 46,0 мм на неподвижной шкале (рис. 3).
- Создать избыточное давление в измерительной ячейке 3–8 бар.
- Закрывать регулирующий клапан.
- Изменять объем в измерительной ячейке или температуру термостата, дожидаясь достижения равновесия. После этого регистрировать величину давления.
- Определить параметры  $s_0$ ,  $C_p$ ,  $C_T$  и  $\nu$ , находя минимум функции  $Q$ . (2).

Определив параметры  $s_0$ ,  $C_p$ ,  $C_T$  и  $\nu$  можно найти объем измерительной ячейки (1) при заданной температуре, положении поршня и соответствующему им давлению.

В методички [2] приводится пример определения параметров.

## Примеры измерений

Таблица 1 Измеренные значения для калибровки

$i$	$s_i$ / мм	$t_i$	$P_i$ / бар
1	40,0	20,0 °C	6,6
2	20,0	20,0 °C	12,4
3	10,0	20,0 °C	23,3
4	5,0	20,0 °C	41,8
5	3,5	20,0 °C	53,9
6	5,0	20,0 °C	41,8
7	5,0	10,0 °C	38,9
8	5,0	30,0 °C	45,3
9	5,0	40,0 °C	49,0
10	5,0	50,0 °C	53,5

Получены следующие значения параметров

$$s_0 = 0,19 \text{ мм}, C_p = 0,023 \frac{\text{мм}}{\text{бар}}, C_T = 0,034 \frac{\text{мм}}{\text{градус}} \text{ и}$$

$$\nu = 0,00288 \text{ моль}$$

## Приложение 2.

Наполнение измерительной ячейки SF<sub>6</sub> газом.

Прежде чем заполнять измерительную ячейку рабочим газом желательно провести грубую калибровку нуля (приложение 1).

- Присоединить баллон с SF<sub>6</sub> газом к регулировочному клапану (рис. 3).
- Маховичком установить поршень в положение 10 мм.
- Медленно открыть регулировочный клапан и впускать SF<sub>6</sub> до достижения давления примерно 10 бар.
- Закрывать регулирующий клапан.
- Приоткрыть клапан продувки и сбросить давление почти до 0 бар.
- Закрывать клапан продувки.

## Заполнение газом для испытаний

- После не менее четырех циклов продувки открыть регулировочный клапан и опять поднять давление до 10 бар.
- Закрывать регулирующий клапан.
- Поворачивать маховичок в обратном направлении до тех пор, пока поршень не достигнет положения примерно 46 мм.
- Медленно открыть регулировочный клапан и закрыть его по достижении давления 10 бар.

## Приложение 3.

Определение массы SF<sub>6</sub>

Нониусная шкала (рис. 3, 4) должна быть установлена так, чтобы показания на подвижной шкале (рис. 3, 4) соответствовали реальному объему измерительной ячейки. Далее нониусная шкала не должна перемещаться относительно резьбовой оси (рис. 3), т. е. должна вращаться вместе с ней. Вращая маховичек (рис. 3) установить достаточно большой объем измерительной ячейки ( $V_n$ ), например, объем, соответствующий 46 мм на подвижной шкале. Этому

положению поршня соответствует определенное давление газа в измерительной ячейке, например, 10 ат (изб.).

1. Присоединить к регулировочному клапану (рис. 3) резиновую камеру, либо газонепроницаемый пластмассовый мешок, предварительно взвесив ее. Открыть регулировочный клапан. После заполнения газом резиновой камеры закрыть регулировочный клапан, отсоединить её от клапана и взвесить. Затем вращая маховичек уменьшать объем измерительной ячейки до тех пор, пока давление в ней не станет равным начальному (т.е. 10 ат, обозначим этот объем измерительной ячейке  $V_K$ ).

При взвешивании резиновой камеры, заполненной газом, на весы действует результирующая от двух сил: силы тяжести и выталкивающей силы, действующей со стороны воздуха на резиновую камеру. Для определения массы газа  $SF_6$  необходимо учесть эту выталкивающую силу. Если вместо газа  $SF_6$  резиновую камеру заполнить воздухом, то полная сила, действующая на этот объем воздуха будет равна нулю. Из этого следует, что подъемная сила, действующая на резиновую камеру, равна произведению массы воздуха на ускорение свободного падения. Массу воздуха можно определить, измерив объем резиновой камеры, заполненной газом  $SF_6$ . Таким образом к разнице между весом резиновой камеры с газом  $SF_6$  и без него нужно прибавить произведение объема камеры на плотность воздуха. Так как точно измерить объем газа в камере затруднительно, можно поступить по-другому. Пусть масса газа в камере равна  $m$ . Тогда он занимает объем  $V$ :

$$V = \frac{m}{\rho}$$

Где  $\rho$  - плотности исследуемого газа при условиях, при которых производится измерение массы. Если заполнить этот объем воздухом, то его массу можно определить следующим образом:

$$m_B = V\rho_B = m \frac{\rho_B}{\rho}$$

Пусть при взвешивании получена масса  $m_{\text{и}}$ , тогда

$$m_{\text{и}} = m - m_B.$$

Поставляя в последнее выражение массу воздуха можно получить массу исследуемого газа в камере:

$$m = \frac{m_{\text{и}}}{\left(1 - \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho}\right)} (= 0.91\text{г})$$

Определить массу газа в измерительной ячейке можно следующим образом.

Начальный объем равен:  $V_{\text{н}} = 3.14 \cdot s_{\text{н}}$  (см<sup>3</sup>). Где  $s_{\text{н}}$  – начальное положение поршня (4.6 см).

Конечный объем равен:  $V_{\text{к}} = 3.14 \cdot s_{\text{к}}$  (см<sup>3</sup>). Где  $s_{\text{к}}$  – конечное положение поршня.

Масса SF<sub>6</sub> в измерительной ячейке:

$$M = m + \frac{mV_{\text{к}}}{(V_{\text{н}} - V_{\text{к}})} = m \frac{V_{\text{н}}}{(V_{\text{н}} - V_{\text{к}})} = m \frac{s_{\text{н}}}{(s_{\text{н}} - s_{\text{к}})} (= 1.0\text{г})$$

- Можно определить массу газа SF<sub>6</sub> проще, если принять, что газ идеальный. При больших начальных объемах вдалеке от фазового перехода можно считать газ почти идеальным. Плотность газа SF<sub>6</sub> при 20<sup>0</sup>С и 0.1 МПа:  $\rho = 6.14$  г/л.

Тогда:

$$M = \frac{\rho V_{\text{н}} p_{\text{н}}}{p_{\text{а}}}$$

Где  $p_{\text{н}}$  – абсолютное давление при  $V_{\text{н}}$ ,  $p_{\text{а}} = 0.1$  МПа.

Например, при начальном положении поршня 46 мм и абсолютном давлении 11 ат прямые измерения массы дают значения 1 г, а при вычислении по выше приведенной формуле – 0.97 г.

Данное описание написано на основе [2].

## Литература

- Базаров И. П., Термодинамика, 2010, с. 22.
- Термодинамика. Газовые законы. Реальные газы и точка фазового перехода. КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ РЕАЛЬНОГО ГАЗА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧКИ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА. 3В SCIENTIFIC® ФИЗИКА
- Румер Ю.Б., Рывкин М.Ш. Термодинамика, статистическая физика и кинетика. Новосибирск; Издательство НГУ, 2000 -608 с.
- Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.2: Термодинамика и молекулярная физика. М.; Наука, 1979
- Наблюдение фазовых переходов жидкость-газ и определение критической температуры фреона-13. Лабораторная работа 2.4. Сост. Хайрулин Р.А. – см. настоящий сборник.

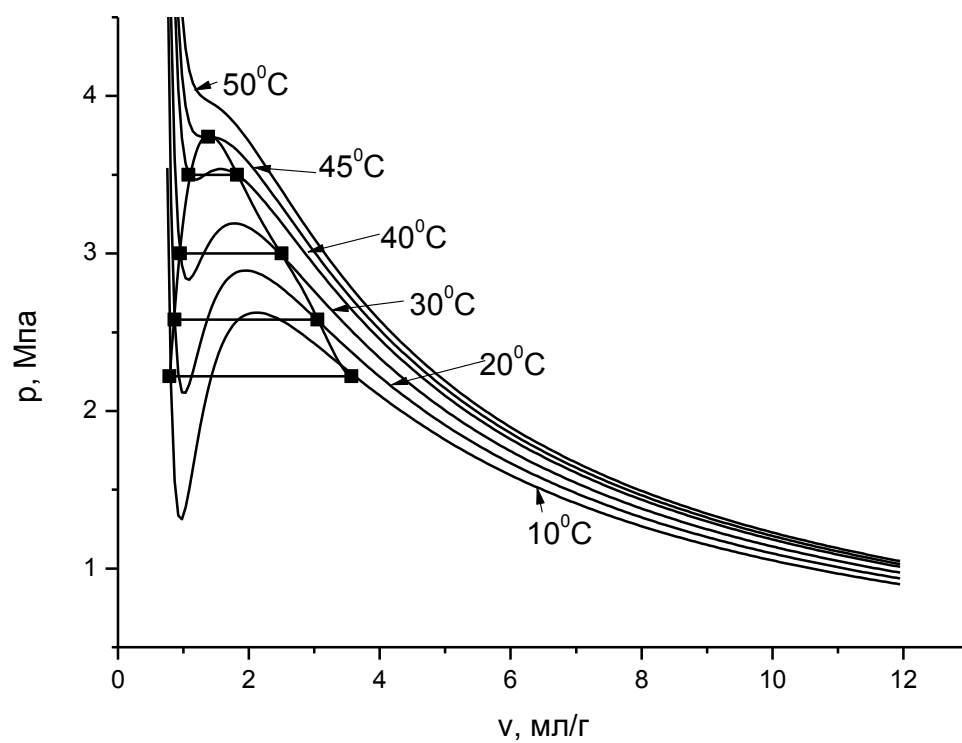


Рис. 1

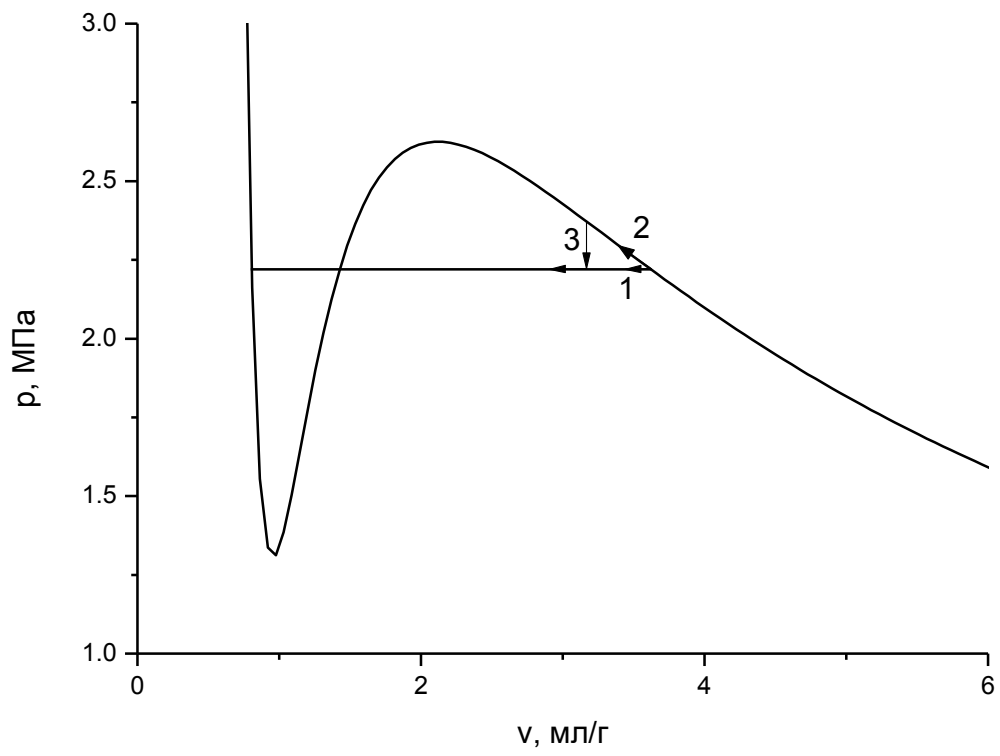


Рис. 2