

## **Построение диаграммы состояния воды в виртуальной лабораторной работе по физике**

Товстуха В.С., Дацун Н.Н., Смешков А.А.  
Донецкий национальный технический университет  
Донецк, Украина

E-mail: tovstukha@ukrpost.net

**Abstract.** This offered material represents the finished modeling computer work on molecular physics for the Higher School students. The classical experiments are repeated by program to virtual obtaining the state diagram of the water. The digital manometer measures the pressure and takes into account the error, which is determinates by program according to the Gauss distribution.

В данной работе предпринята попытка создания программного продукта, лежащего в основе модельной компьютерной лабораторной работы “Виртуальное построение диаграммы состояния воды”, которая идеологически

повторяет классические опыты приборного построения диаграммы в физической лаборатории.

Целью лабораторной работы является изучение процесса изотермического сжатия паров воды, проведение виртуального эксперимента и построение по его результатам диаграммы состояния воды в координатах давление-объем. Выполнение лабораторной работы в модельном варианте в компьютерном классе или в режиме дистанционного образования позволяет избежать многих сложностей практического плана и в первую очередь технических, которые неизбежно возникают при попытке приборной реализации упомянутых опытов с использованием высоких давлений.

Пользователь работает с программой в диалоговом режиме и работа с ней по своей сложности доступна студентам первого курса, даже не знакомым с вычислительной техникой. Программа позволяет в течение лабораторного занятия провести модельный эксперимент и, обработав результаты измерений, построить диаграмму состояния воды.

Очень важным является то, что в работу программы введена подчиняющаяся распределению Гаусса погрешность, делающая процесс измерений и его результаты правдоподобными.

Поведение реальных газов хорошо описывается уравнением Менделеева-Клапейрона

$$pV = \nu RT \quad (1)$$

только при малых плотностях, т. е. при не слишком больших давлениях и достаточно больших температурах. С повышением давления и уменьшением температуры наблюдаются отступления от уравнения (1).

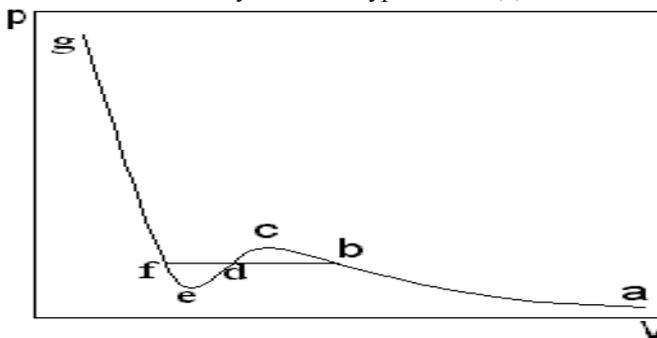


Рис. 1. Зависимость  $p(V)$  при  $T=const$ ;  $abdfg$  – изотерма реального газа;  $abcdefg$  – изотерма Ван-дер-Ваальса

В 1866г. английский физик Т.Эндрюс экспериментально исследовал зависимость молярного объема углекислого газа от давления при изотермическом сжатии. Результаты этих опытов представлены изотермой  $abdfg$  на рисунке 1. Опытная кривая имеет три участка. Правая ветвь  $ab$  при низких давлениях соответствует газообразному состоянию вещества, и сравнительно мало отличается от изотермы идеального газа. На этом схожесть с моделью идеального газа заканчивается. По достижении некоторого определенного давления  $p_n$ , называемого давлением (упругостью) насыщенного

пара при данной температуре, начинается сжижение (конденсация) пара (точка b). При дальнейшем уменьшении объема давление остается неизменным (горизонтальный участок bdf) и лишь все большая доля газа переходит в жидкое состояние. В точке f весь газ переходит в жидкость, и левая крутая ветвь кривой fg представляет собой изотерму сжатия жидкости [1].

Для описания поведения газов в широком интервале плотностей было предложено много различных уравнений (Битти, Бриджмен, Вукалович и др.). Автором самого простого из них и вместе с тем дающего достаточно хорошие результаты является голландский физик Ян Дидерик Ван-дер-Ваальс. Это уравнение получено в 1873г. путем внесения поправок в уравнение (1) и имеет следующий вид:

$$\left( p + v^2 \frac{a}{V^2} \right) (V - vb) = \nu RT, \quad (2)$$

где  $p$  – давление, оказываемое на газ извне (равное давлению газа на стенки сосуда);  $a$  и  $b$  - константы Ван-дер-Ваальса, определяемые опытным путем, имеющие различные значения для разных газов.

Из-за взаимного притяжения между молекулами газ как бы сжимается большим давлением, чем давление, оказываемое газом на стенки сосуда, в котором он заключен. Это учитывается поправкой  $a/V^2$ .

Молекулы обладают конечным объемом и пространство, доступное для движения молекул, оказывается меньшим объема сосуда  $V$ . Это учитывается поправкой  $b$ , которая пропорциональна суммарному объему молекул моля газа.

При выводе уравнения (2) был сделан целый ряд упрощений и пренебрежений и на него следует смотреть как на приближенное уравнение состояния реального газа.

Изотермы газа, подчиняющегося уравнению Ван-дер-Ваальса (2), имеют вид, представленный на рис. 1 кривой abcdefg. Уравнение (2) является уравнением третьей степени относительно объема. В зависимости от численных значений  $p$  и  $T$  для данного газа это уравнение может иметь либо один, либо три действительных корня. Имеется область состояний, где каждому значению давления соответствует три точки изотермы (точки b, d и f), т.е. три различных изотермических состояния. По мере повышения температуры эти три точки сближаются и при  $T=T_k$  сливаются в одну точку К (см. рис. 2), которая является точкой перегиба изотермы. Точка К называется критической точкой. Параметры точки также называются критическими (критическая температура  $T_k$ , критическое давление  $p_k$ , критический объем  $V_k$ ).

Критическая точка замечательна тем, что при приближении к ней уменьшаются различия между жидким и газообразным состояниями вещества. В критическом состоянии обращаются в ноль разность молярных объемов жидкости и насыщенного пара, удельная теплота парообразования и коэффициент поверхностного натяжения жидкости. Это можно наблюдать при любом пересечении кривой nK (см. рис. 2). Эту температуру Д.И.Менделеев в 1860 г. называл температурой абсолютного кипения. Критические температуры различных веществ были подробно исследованы профессором Киевского университета Михаилом Петровичем Авенариусом.

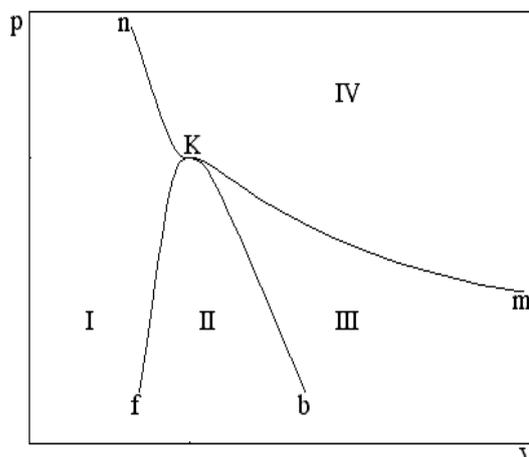


Рис. 2. Диаграмма состояния реального газа

Сравнение изотерм Ван-дер-Ваальса с экспериментальными изотермами показывает, что теоретические изотермы хорошо описывают не только область газообразного состояния вещества, но также области двухфазного и жидкого состояний.

Волнообразный участок  $bcd$ ef изотермы Ван-дер-Ваальса, относящийся к двухфазному состоянию вещества, сильно отличается от соответствующего горизонтального участка  $bdf$  экспериментальной изотермы.

Опыты показывают, что некоторые состояния, соответствующие участкам  $bc$  и  $ef$  изотерм Ван-дер-Ваальса, осуществимы. При медленном изотермическом сжатии газа, не содержащего пылинок, ионов и других центров конденсации, можно получить состояния, соответствующие участку изотермы  $bc$ . Такие состояния являются состояниями пересыщенного или переохлажденного пара. Они являются неустойчивыми или метастабильными. Оказавшись в таком состоянии пар через некоторое время самопроизвольно скачкообразно переходит в состояние, соответствующее участку  $bd$  изотермы реального газа. Это сопровождается конденсацией части пара, снимающей пересыщение. Введение в пересыщенный пар пылинок или ионов стимулирует быструю конденсацию. Это явление используется для наблюдения траекторий движения элементарных частиц в камере Вильсона. Аналогично, производя расширение жидкости, очищенной от механических примесей и других центров кипения, можно получить состояния, соответствующее участку  $ef$ . Это метастабильные состояния перегретой жидкости. Его можно получить иначе, медленно нагревая очищенную жидкость в сосуде с гладкими стенками.

Участок  $cde$ , на котором при сжатии давление должно падать, на практике неосуществим.

Если на  $pV$ -диаграмме нанести точки  $b$  и  $f$  при различных температурах, то получим две пограничные кривые  $bK$  и  $fK$ , смыкающиеся в критической точке  $K$  (рис. 2). Пограничная кривая кипения  $fK$  отделяет однофазную область I жидкого состояния вещества от двухфазной области II

его влажного пара. Пара, находящегося в динамическом равновесии со своей жидкостью. Она является кривой начала фазового перехода из жидкого состояния в газообразное при увеличении объема и кривой окончания обратного фазового перехода при сжатии. Пограничная кривая конденсации  $bK$  отделяет двухфазную область II от однофазной области III парообразного состояния вещества. Кривая  $mKn$  является изотермой Ван-дер-Ваальса при критической температуре  $T_k$ . Она совпадает с изотермой реального газа при этой температуре. При температурах выше критической (область IV) вещество находится в газообразном состоянии. Газообразное состояние отличается от парообразного только лишь тем, что изотермически пар можно перевести в жидкость, а газ – нельзя.

Виртуальная экспериментальная установка создается компьютером и состоит из цилиндра, закрытого поршнем. На левую боковую сторону цилиндра нанесены метки шкалы высоты в логарифмическом масштабе. Это значит, что при смещении на одно деление, высота меняется не на столько-то единиц, а во столько-то раз. В данном случае – в десять раз. В откачанное пространство под поршень помещен один моль чистой воды. Площадь основания цилиндра равна  $10 \text{ см}^2$ . Экспериментатор может изменять температуру цилиндра и высоту расположения поршня, которые индицируются на расположенных справа циферблатах. Для задания температуры или высоты нужно активировать соответствующий циферблат нажатием кнопки T или H соответственно. После этого стрелкой  $\uparrow$  или  $\downarrow$  производится соответственно увеличение или уменьшение численного значения выбранного параметра. После получения нужного значения оно фиксируется нажатием клавиши Enter. Это автоматически активирует барометрический циферблат, показывающий давление в цилиндре. Если часть воды находится в жидком состоянии, то конденсат показывается синим цветом на дне сосуда.

К выполнению лабораторной работы допускаются студенты, успешно прошедшие тестирование. При тестировании задается вопрос и дается четыре варианта ответов, среди которых правильных может быть несколько. Выбор варианта ответа производится стрелкой  $\uparrow$  или  $\downarrow$ . Отметка правильного ответа делается клавишей 'пробел'. Ею же делают отмену отметки. Ввод выбранных вариантов ответов делается клавишей Enter. Программа реагирует на это выдачей информации о качестве ответа с отметками красным карандашом в случае ошибок. Переход к следующему вопросу производится клавишей Enter.

## Литература

1. Савельев И.В., Курс общей физики, кн.2. -М.; Астрель АСТ, 2001, -368 с.