

## Лабораторная работа № 2.4

### УРАВНЕНИЕ ВАН-ДЕР-ВААЛЬСА

#### 2.4.1. Цель работы

Целью лабораторной работы является экспериментальное подтверждение закономерностей поведения реального газа.

#### 2.4.2. Краткая теория

*Физическим газом* называется вещество, находящееся в газообразном состоянии.

«*Идеальный газ*» – модель, хорошо описывающая физический газ, находящийся в сильно разреженном состоянии (при не слишком больших давлениях и достаточно высоких температурах). Молекулы идеального газа являются материальными точками и на расстоянии не взаимодействуют друг с другом.

*Уравнение состояния идеального газа* (уравнение Менделеева – Клапейрона) имеет вид

$$pV = \nu RT, \quad (2.4.1)$$

где  $p$  – давление газа;

$V$  – объем газа;

$\nu$  – количество молей;

$R$  – универсальная газовая постоянная, равная 8,31 Дж/(моль·К);

$T$  – абсолютная температура газа.

Более точная модель физического (реального) газа была предложена Ван-дер-Ваальсом. Она также является приближенной, но лучше описывает процессы по сравнению с моделью «идеальный газ». Иногда эту модель называют «реальный газ». Между молекулами реального газа действуют силы притяжения и отталкивания.

Уравнение состояния реального газа (уравнение Ван-дер-Ваальса) имеет следующий вид:

$$\left(p + \frac{v^2 a}{V^2}\right)(V - vb) = vRT, \quad (2.4.2)$$

где  $a$  и  $b$  – константы Ван-дер-Ваальса.

Добавка к внешнему давлению ( $a$ ) обусловлена взаимным притяжением молекул друг к другу.

Поправка к объему ( $b$ ) характеризует ту часть объема, которая недоступна для движения молекул. Она равна нескольким суммарным объемам молекул, содержащихся в газе.

Изотермой называется зависимость давления от объема газа при постоянной температуре.

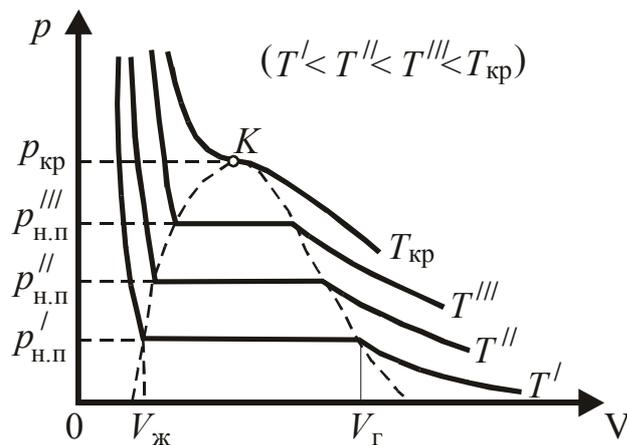


Рис. 2.4.1. Изотермы физического (реального) газа

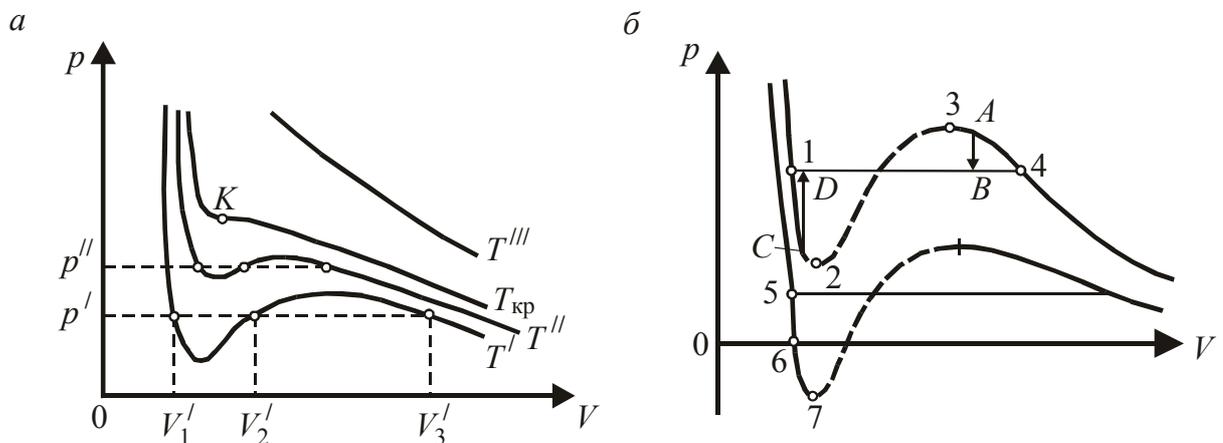


Рис. 2.4.2. Изотермы Ван-дер-Ваальса

На рис. 2.4.1 приведены изотермы некоторого физического (реального) газа, а на рис. 2.4.2 – изотермы Ван-дер-Ваальса.

При некоторой температуре  $T_{кр}$ , которая называется критической, на изотерме наблюдается только одна точка перегиба К, а экстремумы отсутствуют. Точка К называется критической точкой, а соответствующие ей объем  $V_{кр}$ , давление  $p_{кр}$  и температура  $T_{кр}$  – называются критическими. Касательная к изотерме в точке К параллельна оси абсцисс.

Уравнения для критических параметров

$$V_{кр} = 3b, \quad p_{кр} = \frac{a}{27b^2}, \quad T_{кр} = \frac{8a}{27Rb}. \quad (2.4.3)$$

Тогда некоторый параметр  $A$  для одного моля реального газа

$$A = \frac{p_{кр}V_{кр}}{RT_{кр}} = \frac{3}{8} = 0,375, \quad (2.4.4)$$

а для числа молей газа  $\nu$

$$A' = A\nu = 0,375\nu. \quad (2.4.5)$$

При температуре выше критической вещество может находиться только в газообразном состоянии. При температуре ниже критической вещество может находиться как в газообразном, так и в жидком состояниях.

Жидкое состояние описывается левыми (по отношению к точке перегиба) частями графиков на рис. 2.4.2, *а*, 2.4.3, *б* и характерно тем, что небольшое уменьшение объема вещества может произойти только при резком увеличении давления (жидкость практически не сжимается).

Изотермы Ван-дер-Ваальса примерно совпадают с изотермами реального газа на участках, соответствующих однофазным состояниям вещества.

Рис. 2.4.2, *б* разъясняет поведение вещества при разных внешних условиях. В области, где присутствуют две фазы, S-образный участок (1 – 2 – 3 – 4) изотермы Ван-дер-Ваальса заменяется горизонтальным участком (1 – 4) реальной изотермы.

Состояния, соответствующие участку 2 – 3, не могут быть реализованы, так как сжимаемость вещества  $\beta = \frac{dV}{dp}$  здесь отрицательна.

Участок 3 – 4 соответствует переохлажденному пару. Это состояние реализуется при практическом отсутствии центров конденсации и внешних воздействий.

Участок 1 – 2 соответствует перегретой жидкости. Это состояние реализуется при отсутствии примесей, способных быть центрами кипения.

### 2.4.3. Порядок выполнения работы

Запустите программу «Открытая физика 1.1». Выберите «Термодинамика и молекулярная физика», «Изотермы реального газа». Нажмите вверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения. Закройте внутреннее окно, нажав кнопку с крестом справа вверху этого окна.

Внимательно рассмотрите рисунок 2.4.3, найдите все регулируемые величины и запишите их в соответствующую таблицу в отчете (см. с. 6).

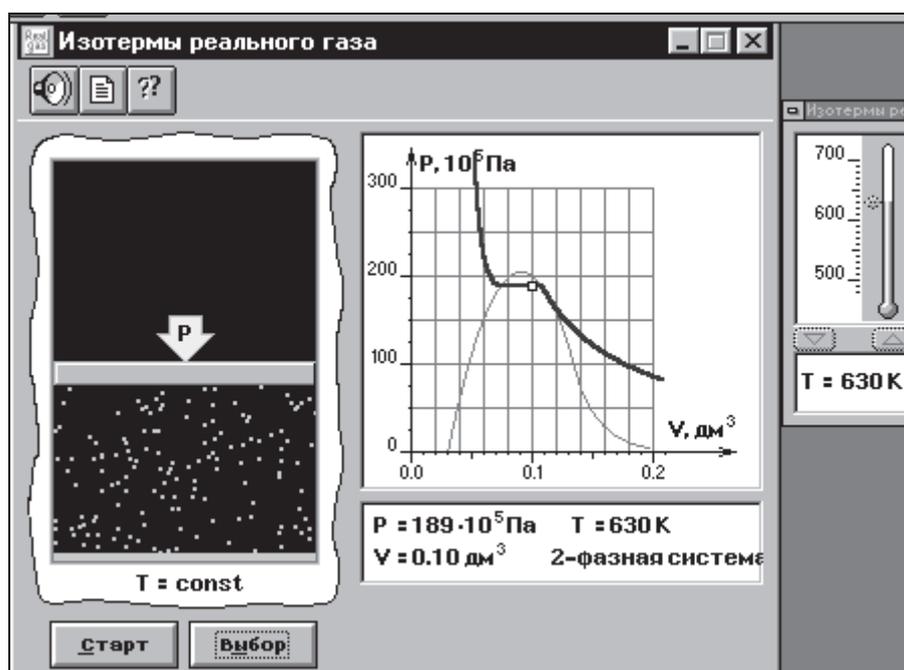


Рис. 2.4.3. Изотермы реального газа

Нажмите мышью кнопку «Старт». Наблюдайте перемещение поршня на левой картинке модели и перемещение маленького квадратика по красной кривой теоретической адиабаты. Попробуйте останавливать процесс нажатием кнопки «Стоп» на экране. Последующий запуск процесса осуществляется нажатием кнопки «Старт».

## 1. Определение критических параметров

Щелкните левой кнопкой мыши, когда ее маркер на кнопке «Выбор». Подведите маркер мыши к кнопке у верхней границы столбика на регуляторе температуры и нажмите левую кнопку мыши. Удерживая кнопку в нажатом состоянии, перемещайте границу столбика до тех пор, пока на правом экране не появится критическая изотерма с точкой перегиба и без экстремумов.

Запишите в свой отчет под табл. 2.4.2 значения критических параметров  $T_{кр}$ ,  $V_{кр}$ ,  $p_{кр}$ .

## 2. Исследование изотерм газа Ван-дер-Ваальса

1. Нажмите кнопку «Выбор» и установите температуру  $T_1$  из таблицы начальных значений 2.4.1 для вашей бригады.

2. Запустите процесс, нажав кнопку «Старт», и останавливайте, нажимая кнопку «Стоп», когда маленький квадратик на теоретической изотерме (красная кривая) будет находиться в точках, соответствующих объемам 0,1; 0,12; 0,14; 0,16; 0,18 и 0,2 дм<sup>3</sup> (6 значений), записывая при остановке значения в табл. 2.4.2 в первую пустую строку.

Если у вас не получается останавливать процесс точно в указанных точках, то можно провести измерения в пошаговом режиме. Для этого щелкните мышью кнопку «||» в верхнем ряду кнопок. Нажмите кнопку «Старт».

Нажимайте мышью несколько раз кнопку «▶|» вверху окна, пока не достигните нужного значения объема. Запишите необходимые величины. Для продолжения эксперимента опять нажимайте кнопку «▶|», пока не достигните следующего значения объема, и т. д. Для завершения эксперимента нажмите кнопку «▶▶».

3. Устанавливая по очереди следующие значения температуры ( $T_2 — T_4$ ) из табл. 2.4.1, повторите измерения, записывая результаты также в табл. 2.4.2.

Таблица 2.4.1

### Значения температуры

Бригада	1	2	3	4	5	6	7	8
$T_1$	500	510	520	530	540	550	560	570
$T_2$	580	590	600	610	620	630	640	650
$T_3$	660	670	680	690	660	670	680	690
$T_4$	690	700	690	700	690	700	690	700

Таблица 2.4.2

### Результаты измерений

$V, \text{ дм}^3$	0,1	0,12	0,14	0,16	0,18	0,2
	$p, \text{ кПа}$					
$T_1 = \text{ К}$						
$T_2 = \text{ К}$						
$T_3 = \text{ К}$						
$T_4 = \text{ К}$						
$1/V, \text{ м}^{-3}$						

### 2.4.4. Обработка результатов измерений

1. Рассчитайте в системе СИ величину, обратную объему, и запишите результаты в табл. 2.4.2.

2. По измеренным значениям критических параметров вычислите константу  $A$  для одного моля газа.

$$A = \frac{p_{\text{кр}} V_{\text{кр}}}{RT_{\text{кр}}} . \quad (2.4.6)$$

3. По данным табл. 2.4.2 постройте на одном рисунке графики экспериментальных зависимостей давления  $p$  от обратного объема  $1/V$  для всех изотермических процессов (указав на них температуры).

4. Для каждого графика на линейной части зависимости определите (см. с. 7) число молей вещества, используя формулу

$$\nu = \frac{1}{RT} \frac{\Delta(p)}{\Delta(1/V)}. \quad (2.4.7)$$

5. Вычислите среднее значение  $\nu$  и экспериментальное значение константы  $A'$  по формуле (2.4.5).

6. Используя значение параметра  $A$ , рассчитанное в п. 1 через критические параметры, вычислите теоретическое значение константы  $A'$ .

7. Рассчитайте относительную и среднюю абсолютную погрешности определения  $A'$  (см. с. 8).

8. Запишите ответ для  $A'$  и вывод.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое физический газ?
2. Что такое идеальный газ? При каких условиях физический газ можно описывать моделью идеального газа?
3. Запишите уравнение состояния идеального газа.
4. Запишите уравнение состояния реального газа.
5. Что определяют константы Ван-дер-Ваальса?
6. Что такое изотерма?
7. В чем особенности критической изотермы?
8. Какова особенность поведения газа при температуре выше критической? Ниже критической?
9. На каких участках изотермы Ван-дер-Ваальса примерно совпадают с изотермами реального газа?