

**Министерство образования и науки Российской Федерации**

**ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ  
ВОЗДУХА ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ  
ЗЕМЛИ**

Методические указания

Иркутск 2004

Печатается по решению  
научно- методического совета  
физического факультета ИГУ

Даны методические указания к определению некоторых физических характеристик воздуха и его массы в учебной.

Предназначена для студентов 1 курса  
естественных факультетов

Библиогр. 1 назв.

Составители: к.ф.-м.н., доц. Л.И.Алексеева, д.ф.-м.н., проф. Кринберг И.А.

Рецензент: д.т.н., проф. Л.А.Щербаченко

# **Определение параметров воздуха вблизи поверхности Земли**

## **Цель работы:**

Повторить основные положения, определения, законы и выводы молекулярно-кинетической теории газов.

Определить объем и массу воздуха в учебной аудитории.

Вычислить некоторые физические характеристики воздуха.

Оценить расположение г.Иркутска над уровнем моря.

## **Приборы и принадлежности:**

Барометр, термометр, рулетка.

## **Краткая теория:**

Молекулярная физика изучает строение и свойства вещества: твердые, жидкие, газообразные и макроскопические процессы в них, обусловленные тем, что все тела состоят из огромного числа молекул, связанных силами взаимодействия и находящихся в непрерывном хаотическом движении.

В молекулярно-кинетической теории используется модель идеального газа, удовлетворяющая следующим условиям:

- собственный объем молекул пренебрежимо мал по сравнению с объемом сосуда;
- между молекулами газа отсутствуют силы взаимодействия;
- столкновения молекул газа между собой и со стенками сосуда абсолютно упругие.

Модель идеального газа можно использовать при изучении реальных газов, так как они близки по своим свойствам к идеальному газу при нормальных условиях, а также при низких давлениях и высоких температурах. Поэтому воздух атмосферы Земли можно считать идеальным газом.

**Вывод из опытных законов уравнения состояния идеального газа.** Состояние некоторой массы газа определяется тремя термодинамическими параметрами: давлением  $P$ , объемом  $V$  и температурой  $T$ . Между этими параметрами существует определенная связь, называемая уравнением состояния, где каждая из переменных величин является функцией двух других. Используя законы Бойля-Мариотта, Гей-Люссака и Шарля, Клайперон, а затем Менделеев привели этот закон к виду, применимому для любой массы газа ( $m$ ):

$$PV = \frac{m}{M} RT, \quad \text{или} \quad P = \frac{\rho}{M} RT. \quad (1)$$

Здесь  $R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$  - универсальная газовая постоянная;  $M$  - масса одного моля газа (для воздуха

средняя молярная масса  $M=0,029$  кг/моль),  $\rho = \frac{m}{V}$  - плотность.

Домножив числитель и знаменатель правой части формулы (1) на число частиц в одном моле, т.е. число Авогадро ( $N_a = 6,02 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>), получим

$$PV = \frac{m}{m_0} kT, \quad (2)$$

где  $k = \frac{R}{N_a} = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К - постоянная Больцмана, а средняя масса одной молекулы газа определяется из соотношения

$$m_0 = \frac{M}{N_a} \quad (3)$$

Очевидно, что  $\frac{m}{m_0} = N$  есть общее число молекул газа в объеме  $V$ , а  $\frac{N}{V} = n$  - их концентрация. Тогда из (2) можно получить еще две формы записи уравнения состояния

$$P = nkT \quad \text{и} \quad P = \frac{\rho}{m_0} kT, \quad (4)$$

где  $\rho = \frac{m}{V} = m_0 n$  - плотность газа (5)

Из выражения (4) следует, что *давление идеального газа при данной температуре прямо пропорционально концентрации его молекул.*

При одинаковых температуре и давлении все газы содержат в единице объема одинаковое число молекул, которое при нормальных условиях на уровне моря:  $T_0 = 273 \text{ К}$  и  $P_0 = 760 \text{ мм.рт.ст.} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$  - называется постоянной Лошмидта

$$N_L = \frac{P_0}{kT_0} = 2,687 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3} \quad (6)$$

Плотность воздуха при нормальных условиях  $\rho_0 = 1,29 \text{ кг/м}^3$

**Вывод основного уравнения молекулярно-кинетической теории газов.** Основное уравнение идеальных газов связывает параметры состояния газа с характеристиками движения его молекул, т.е. устанавливает зависимость между давлением, температурой и кинетической энергией хаотического движения молекул. *Давление газа определяется совокупностью упругих ударов молекул о стенку сосуда.* При этом каждая молекула в момент соударения передает стенке импульс силы, равный  $F_1 \Delta t = \Delta(m_0 v) = 2m_0 v$ , где  $v$  - средняя скорость хаотического движения молекул.

Очевидно, что за время  $\Delta t$  до стенки площадью  $\Delta S$  дойдут лишь молекулы, находящиеся на расстоянии  $\Delta l = v \Delta t$ , т.е. в объеме  $\Delta V = \Delta S v \Delta t$ . Так как все направления хаотического движения равновероятны, то можно считать, что в каждом направлении движется 1/6 часть всех молекул, находящихся в данном объеме, т.е.

$N = \frac{1}{6}n\Delta V$ . Тогда суммарная сила, действующая на площадку  $\Delta S$ , будет равна  $F = F_1N$  (где  $F_1 = 2m_0v/\Delta t$ ), а давление определяется как

$$P = \frac{F}{\Delta S} = \frac{1}{3}nm_0v^2 \quad (7)$$

Более строгое теоретическое рассмотрение показывает, что величина  $mv^2/2 = \langle \varepsilon \rangle$  есть средняя кинетическая энергия одной молекулы. Следовательно, введенная выше скорость  $v$  есть средняя квадратичная скорость молекул. Тогда из формулы (6) получим соотношение

$$P = \frac{2}{3}n\langle \varepsilon \rangle \quad , \quad (8)$$

которое называется основным уравнением молекулярно-кинетической теории газов. Приравняв формулы (4) и (8), получим:

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{m_0v^2}{2} = \frac{3}{2}kT, \quad (9)$$

$$v = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}, \quad (10)$$

из которых следует, что средняя кинетическая энергия и среднеквадратичная скорость движения молекул зависят только от температуры. Формула (9) раскрывает молекулярно-кинетическое толкование температуры: *термодинамическая температура является мерой*

*средней кинетической энергии хаотического движения молекул идеального газа.*

Следует отметить, что формулы (1) и (4) были получены для небольших объемов газов в сосудах, внутри которых распределение молекул по объему можно считать однородным. В открытых системах, когда распределение молекул в пространстве становится неоднородным (например, в атмосфере Земли), такое понятие как объем, занимаемый газом, теряет свой смысл. В этом, случае определяющей характеристикой состояния воздуха является концентрация молекул  $n$ , и применение уравнения состояния идеального газа по формуле (4) становится более предпочтительным.

Наиболее легко измеряемыми параметрами газа являются температура и давление. Зная их величины при любых условиях, отличающихся от нормальных, можно из соотношения (4) найти концентрацию частиц

$$n = \frac{P}{kT}, \quad (11)$$

а затем плотность  $\rho = m_0 n$  и массу газа  $m = \rho V$  в некотором объеме  $V$ . Массу молекулы воздуха можно вычислить по формуле (3).

**Определение высоты расположения г.Иркутска над уровнем моря.** Молекулы атмосферного воздуха находятся в потенциальном поле тяготения Земли и участвуют в тепловом хаотическом движении. Эти две причины приводят к некоторому стационарному



распределению параметров газа на высоте, при котором концентрация молекул и давление газа с высотой убывают. С некоторым приближением можно принять, что при небольшом изменении высоты уменьшение температуры незначительно. В этом случае, можно воспользоваться барометрической формулой, вывод которой сделан в приложении (П-5), и по формуле (П-4) определить высоту расположения г.Иркутска над уровнем моря (первый способ)

$$h = H \ln \frac{P_0}{P}; \quad H = \frac{RT}{Mg} \quad (12)$$

Высоту расположения г.Иркутска можно определить и по формуле (П-6), вывод которой сделан в приложении (второй способ)

$$h = \frac{\Delta P}{\rho_0 q} = \frac{\rho q}{\rho_0 q} \Delta h_{\text{бар}} = \frac{\rho_{pT}}{\rho_0} \Delta h_{\text{бар}}, \quad (13)$$

Здесь  $\rho_{pT} = 13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_0$  - плотность воздуха при нормальных условиях,  $\Delta h_{\text{бар}}$  - разность показаний барометра в метрах на уровне моря и на некоторой высоте  $h$ .

Для Иркутска среднее годовое давление составляет 722 мм.рт.ст. (962 гПа). Оно изменяется в зависимости от времени года, принимая зимой значения несколько выше, а летом – ниже этой величины. Так для августа среднее значение составляет 717, а в январе – 728 мм.рт.ст.

На самом низком месте в Иркутске под старым Ангарским мостом расположен гидропост, на котором

зафиксирована высота этого места над уровнем мирового океана 424м, на метеоплощадке по ул.Трилиссера- 467 м.

## **Порядок выполнения работы:**

### **Измерения.**

1. Измерить длину, ширину и высоту комнаты. Вычислить объем  $V$ .
2. Измерить температуру воздуха в комнате и на улице и перевести их из градусов Цельсия в Кельвины.
3. Измерить давление воздуха по барометру и перевести его из мм.рт.ст. в Па ( $\text{Н/м}^2$ ).

### **Вычисления.**

1. Используя соотношение (11), найти концентрацию молекул воздуха в комнате и на улице, учитывая, что давление воздуха одинаковое. Сравнить полученные значения с числом Лошмидта (6). Объяснить разницу.
2. Вычислить среднюю массу одной молекулы воздуха по формуле (3).
3. Вычислить плотность воздуха и массу воздуха в комнате согласно (5).
4. Вычислить объем  $V_1 = 1/n$ , приходящийся на одну частицу, а затем среднее расстояние между

частицами  $l = \sqrt[3]{V_1}$ . Сравнить полученное значение с размером молекулы. Эффективный диаметр молекулы  $\approx 10^{-10} \text{ м}$ .

5. Найти среднеквадратичную скорость молекул в комнате, на улице и при нормальных условиях. Сделать вывод.
6. Вычислить двумя способами высоту расположения г.Иркутска над уровнем моря (14) и (15). Сопоставить с реальной величиной  $h=424 \text{ м}$ .

### **Контрольные вопросы**

1. Сформулируйте основные положения молекулярно-кинетической теории вещества.
2. Дайте определения: что такое идеальный газ, давление газа на стенки сосуда, температура газа, абсолютный нуль, число Авогадро.
3. Запишите уравнение состояния идеального газа.
4. Сделайте вывод основного уравнения молекулярно-кинетической теории идеального газа.
5. Объясните, как и почему с высотой изменяется концентрация молекул и давление воздуха.

### **Литература**

Трофимова Т.И. Курс физики: Учебное пособие для вузов. – М.: Высш.шк. 2002. – 542 с.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Гидростатическое равновесие атмосферы

Рассмотрим слой воздуха (площадью  $S$ ) находящийся на высоте  $h$  и имеющий малую толщину  $dh$ . Как известно, плотность и давление воздуха убывают с высотой. Поэтому сила давления  $pS$ , действующая на слой снизу, будет больше, чем сила давления  $(p-dp)S$ , действующая на слой сверху (на высоте  $h+dh$ ). Воздух остается неподвижным (находится в равновесии), если разность сил давления на слой (направленная вверх) будет равна силе тяжести, действующей на слой (с массой  $\rho Sdh$ ), т.е.

$$-dpS = \rho Sdhq \quad (\text{П-1})$$

Учитывая, что из соотношения (1) плотность  $\rho = \frac{PM}{RT}$

получаем  $\frac{dP}{P} = -\frac{Mq}{RT} dh$ ,

тогда  $\frac{dP}{P} = -\frac{dh}{H}$ , (П-2)

где  $H = \frac{RT}{Mq}$ . (П-3)

Уравнение (П-2) называется уравнением гидростатического равновесия газа. Если не учитывать изменение температуры и состава газа с высотой и считать  $H = const$ , то уравнение (П-2) можно проинтегрировать (в пределах от  $h=0$  до  $h$ ) и получить решение

$$\ln \frac{P}{P_0} = -\frac{h}{H} \quad (\text{П-4})$$

где  $P_0$  - давление на уровне моря (при  $h=0$ ).

Потенцируя (П-4), получаем

$$P(h) = P_0 e^{-\frac{h}{H}} \quad (\text{П-5})$$

Соотношение (П-5) называется барометрической формулой, а входящий в него параметр  $H$  - высотой однородной атмосферы. Из (П-5) видно, что на высоте  $h = H \approx 8000 \text{ м}$  давление уменьшается в  $e = 2,71$  раза по сравнению с уровнем моря.

Для малых высот  $h \ll H$ , имеем  $e^{-\frac{h}{H}} \approx 1 - \frac{h}{H}$ . Из (П-5), с

учетом (1)  $\rho_0 = \frac{P_0 M}{RT}$ , следует

$$P \approx P_0 - P_0 \frac{h}{H} = P_0 - P_0 \frac{M}{RT} gh = P_0 - \rho_0 gh,$$

тогда  $P_0 - P = \Delta P = \rho_0 gh$ . (П-6)

Откуда  $h = \frac{\Delta P}{\rho_0 g}$  (П-7)

высота некоторой местности может быть определена по разности атмосферных давлений над уровнем моря и на этой высоте.

# **Определение параметров воздуха вблизи поверхности Земли**

## **Методические указания**

Составители: Лариса Ивановна Алексеева  
Игорь Августович Кринберг

Редактор:

Подписано в печать

Печать трафаретная

Редакционно-издательский отдел

Иркутского государственного университета  
664003, Иркутск, бул.Гагарина, 36.