

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), $r = \frac{m}{V}$ - 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⁻¹), 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

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

где $r = \frac{m}{V} = m_0 n$ - 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 $r_0 = 1,29 \text{ кг/м}^3$

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 Δt до стенки площадью ΔS 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 ΔS , 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 $mv^2/2 = \langle e \rangle$ есть средняя кинетическая энергия одной молекулы. Следовательно, введенная выше скорость v есть средняя квадратичная скорость молекул. Тогда из формулы (6) получим соотношение

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

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

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

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

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 $r = m_0 n$ и массу газа $m = rV$ 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)

$$h = \frac{\Delta P}{r_0 q} = \frac{r q}{r_0 q} \Delta h_{\text{бар}} = \frac{r_{pT}}{r_0} \Delta h_{\text{бар}}, \quad (13)$$

Здесь $r_{pT} = 13,6 \cdot 10^3 \text{ кг} / \text{м}^3$, r_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 (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

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 $rSdh$), т.е.

$$-dpS = rSdhq \quad (\text{П-1})$$

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

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) $r_0 = \frac{P_0 M}{RT}$, следует

$$P \approx P_0 - P_0 \frac{h}{H} = P_0 - P_0 \frac{M}{RT} qh = P_0 - r_0 qh,$$

тогда $P_0 - P = \Delta P = r_0 qh$. (П-6)

Откуда $h = \frac{\Delta P}{r_0 q}$ (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.