

А.Б. Рыхлов

**Лабораторные работы по дисциплине
«Физика атмосферы, океана и вод суши»**

**Учебно-методическое пособие для студентов, обучающихся по
направлению 05.03.05 «Прикладная гидрометеорология»**

Саратов, 2018

Рыхлов А.Б. Лабораторные работы по дисциплине «Физика атмосферы, океана и вод суши». Учебно-методическое пособие для студентов, обучающихся по направлению 05.03.05 «Прикладная гидрометеорология»

В учебно-методическое пособие включены наиболее важные разделы, широко используемые в других дисциплинах. Рассматриваются основы статики, динамики и термодинамики атмосферы, тепловой режим почвы, водоемов и нижнего слоя атмосферы, круговорот воды в атмосфере. Во всех работах имеются вводные пояснения, указания к выполнению работ и критерии их оценки.

САРАТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н. Г. Чернышевского

Содержание

	стр.
Введение	4
Лабораторная работа № 1	5
Лабораторная работа № 2	16
Лабораторная работа № 3	26

САРАТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н. Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО

Введение

Предлагаемые лабораторные работы по дисциплине «Физика атмосферы, океана и вод суши» составлены в соответствии с программой этого курса. Лабораторные работы разработаны на основе изданных в разное время задачников, но материал подвергнут существенной переработке, с учетом новых достижений в метеорологии, новых Наставлений и ГОСТов, а также в соответствии с изменениями программы дисциплины. В пособие включены наиболее важные разделы общей метеорологии, широко используемые в других дисциплинах. Рассматриваются основы статики, динамики и термодинамики атмосферы, тепловой режим почвы, водоемов и нижнего слоя атмосферы, круговорот воды в атмосфере. Во всех работах имеются вводные пояснения, указания к выполнению работ и критерии их оценки.

Основной целью предлагаемых в работах задач является разбор и закрепление на конкретных исходных данных основной части материала, сообщаемого студентам в лекциях и учебниках. Большинство задач сформулировано так, чтобы итогом их решения был не только численный ответ, но и разносторонний анализ его физического смысла. Поэтому во многих задачах помимо исходных данных предлагается ряд вопросов для обсуждения полученного ответа. Для этих же целей в работы помещены не только собственно задачи, но и упражнения на построение и анализ различных графиков, характеризующих пространственное и временное распределение метеорологических величин. В них включен ряд задач, имеющих по 30 вариантов исходных данных, что должно способствовать индивидуализации самостоятельной работы студентов.

Вводные тексты в лабораторных работах написаны несколько подробнее и содержат значительное количество формул, необходимых при выполнении работ. При составлении пособия обобщен многолетний опыт

проведения практических занятий, накопленный автором на кафедре метеорологии и климатологии.

Лабораторная работа №1

Уравнения состояния сухого и влажного воздуха

Цель работы – отработка навыков использования уравнений состояния для определения плотности сухого и влажного воздуха, виртуальной температуры, нахождения необходимых для этого гигрометрических характеристик.

Материалы для работы:

1. Психрометрические таблицы – Л.: Гидрометеиздат, 1981.
2. Матвеев Л.Т. Физика атмосферы – СПб.: Гидрометеиздат, 2008.

Методические рекомендации:

Изучить соответствующие разделы и усвоить основные формулы, выражающие зависимости физических величин.

Уравнение состояния сухого воздуха. Состояние каждого из атмосферных газов характеризуется значениями трех величин: температуры T , давления P и плотности ρ (или объема V). Эти величины всегда связаны между собой некоторым уравнением, которое носит название *уравнения состояния газа*. Для одного грамм-моля идеального газа это уравнение имеет вид

$$\frac{PV}{T} = R^*,$$

где R^* - универсальная газовая постоянная. Величина R^* не зависит от природы газа и постоянна для любого из них. Ее значение определено для нормальных условий, при которых 1 грамм-моль газа согласно закону Авогадро занимает объем 22,4 литра. $R^* = 8314$ Дж/(кмоль·К).

Для произвольной массы газа это уравнение имеет вид

$$\frac{PV}{T} = \frac{m}{\mu} R^*,$$

где m – масса газа, μ – относительная молекулярная масса газа. Величину $R^*/\mu = R$ называют удельной газовой постоянной, она различна для газов входящих в состав атмосферы. С учетом этого формула для произвольной массы преобразуется к виду

$$PV = mRT.$$

Для массы газа $m = 1$ формула приобретает простой вид $PV = RT$.

Для каждого газа существует так называемая *критическая температура* $T_{кр}$. Если температура газа выше критической ($T > T_{кр}$), то ни при каком давлении газ не может быть переведен в жидкое или твердое состояние, т.е. при $T > T_{кр}$ возможно только газообразное состояние вещества. Приводим значения критических температур атмосферных газов:

Газ	He	H ₂	N ₂	O ₂	CO ₂	H ₂ O
T _{кр}	-268	-240	-147	-119	31	374

Из этих данных следует, что критические температуры всех атмосферных газов, кроме углекислого газа и водяного пара, очень низкие. Температуры, которые наблюдаются в атмосфере на всех высотах, значительно выше критических температур этих газов. Углекислый газ,

хотя и имеет критическую температуру выше, чем обычно наблюдаемые температуры воздуха, далек от состояния насыщения, поскольку его парциальное давление в условиях атмосферы мало.

По своим физическим свойствам газ тем ближе к идеальному, чем выше его температура по сравнению с критической, а также чем меньше его давление по сравнению с давлением насыщения.

При условиях, наблюдающихся в атмосфере, основные газы, входящие в состав воздуха, ведут себя практически как идеальные газы. Поэтому уравнение состояния любого из них имеет вид уравнения состояния идеального газа:

$$P_i V = m_i R_i T, \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

где P_i – парциальное давление, T – температура, V – объем; R_i – удельная газовая постоянная i -го газа, n – число газов, составляющих механическую смесь. Здесь учтено, что температуры газов при контакте выравниваются и газ занимает весь предоставленный ему объем.

Удельная газовая постоянная R_i связана с универсальной газовой постоянной R^* следующим соотношением:

$$R_i = R^* / \mu_i,$$

где μ_i – относительная молекулярная масса i -го газа.

Согласно закону Дальтона, поведение каждого газа в механической смеси не зависит от присутствия других газов, а общее давление смеси равно сумме парциальных давлений, т. е.

$$P = \sum P_i$$

Пусть масса сухого воздуха равна 1, а масса i -го газа m_i . Напишем уравнения состояния для каждого из них

$$P_1 V = m_1 R_1 T$$

$$P_2 V = m_2 R_2 T$$

.....

$$P_n V = m_n R_n T$$

Сложив левые и правые части этих уравнений, получим

$$V \sum P_i = T \sum m_i R_i.$$

Полученное уравнение и представляет собой *уравнение состояния сухого воздуха* для массы $m=1$. Обозначив $\sum m_i R_i = R_c$ уравнение состояния сухого воздуха можно записать в виде

$$PV = R_c T.$$

Значение R_c (удельная газовая постоянная сухого воздуха) можно рассчитать с учетом массовой доли газа в составе воздуха. $R_c = 287$ Дж/(кг·К).

Таким образом, уравнение состояния сухого воздуха имеет тот же вид, что и уравнение состояния идеального газа. При этом удельная газовая постоянная воздуха определяется как среднее взвешенное из парциальных газовых постоянных по формуле.

Относительную молекулярную массу сухого воздуха по углеродной шкале можно получить при известных R_c и R^* по соотношению

$$\mu = R^*/R_c = 28,9645 \text{ кг/кмоль.}$$

Уравнение состояния используется для расчета плотности воздуха. Из определения плотности как отношения массы к объему, т.е. $\rho = m/V$, при $m=1$ следует $\rho = 1/V$ или $V = 1/\rho$. Подставив значение V в уравнение состояния, получаем

$$\rho = \frac{P}{R_c T}$$

Уравнение состояния влажного воздуха. Влажный воздух представляет собой механическую смесь сухого воздуха и водяного пара. Так как критическая температура водяного пара ($T_{кр} = 374^{\circ}\text{C}$) выше наблюдаемых в атмосфере температур, то он в реальных условиях атмосферы может переходить в жидкое и твердое состояния (конденсироваться и сублимироваться). Для начала конденсации водяного пара необходимо, чтобы он достиг состояния насыщения.

Так как реально наблюдаемые температуры в атмосфере ниже критической температуры водяного пара, его физические свойства, вообще говоря, могут отличаться от свойств идеального газа. Однако экспериментальным путем установлено, что физические свойства водяного пара практически близки к свойствам идеального газа.

Перейдем к выводу уравнения состояния влажного воздуха. Для этого выделим в атмосфере 1 кг влажного воздуха. Пусть в нем масса водяного пара s и $(1-s)$ сухого воздуха. Если атмосферное давление P и парциальное давление водяного пара e , то давление сухого воздуха $(P-e)$. Напишем уравнения состояния для водяного пара и сухого воздуха.

$$eV = sR_n T$$
$$(P-e)V = (1-s)R_c T,$$

где $R_{\Pi} = \frac{R^*}{\mu_{\Pi}} = 461 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.

Сложив правые и левые части этих уравнений получаем

$$pV = R_c T \left(1 - s + \frac{R_{\Pi}}{R_c} s \right) = R_c T (1 + 0,608s).$$

В метеорологии для придания этому уравнению вида аналогичного для сухого воздуха множитель $(1 - 0,608s)$ обычно относят к температуре, вводя понятие *виртуальной температуры*

$$T_v = T (1 + 0,608s).$$

Виртуальная температура это условная температура при которой плотность сухого воздуха равнялась бы плотности влажного.

Нередко виртуальную температуру представляют в виде суммы

$$T_v = T + \Delta T_v$$

где $\Delta T_v = T \cdot 0,608s$ — *виртуальный добавок*.

Если водяной пар находится в состоянии насыщения, то ΔT_v при данных T и P достигает наибольшей величины

$$\Delta T_{vm} = 0.378 \frac{E(T)}{P}$$

которая при фиксированном P является функцией одной лишь температуры. Приводим значения максимального виртуального добавка ΔT_{vm} при $p = 1000 \text{ гПа}$:

$T^{\circ}\text{C}$	-40	-30	-20	-15	-10	-5	0	5
---------------------	-----	-----	-----	-----	-----	----	---	---

$\Delta T_{vm} \text{ } ^\circ\text{C}$	0,01	0,03	0,12	0,19	0,30	0,40	0,60	0,90
$T \text{ } ^\circ\text{C}$	10	15	20	25	30	35	40	
$\Delta T_{vm} \text{ } ^\circ\text{C}$	1,3	1,9	2,6	3,6	4,9	6,6	8,9	

Из этих данных вытекает, что виртуальный добавок, а вместе с этим и роль влажности в изменении плотности воздуха малы при низких температурах и достаточно велики при высоких.

С введением виртуальной температуры уравнение состояния влажного воздуха принимает вид

$$PV = R_c T_v$$

Плотность влажного воздуха

$$\rho = \frac{P}{RT_v}$$

При одинаковых температуре и давлении *плотность влажного воздуха всегда меньше плотности сухого воздуха*. Физически это объясняется тем, что в состав влажного воздуха входит более легкий (по сравнению с сухим воздухом) водяной пар, который вытесняет часть сухого воздуха.

При выполнении лабораторной работы необходимо:

1. Особое внимание обратить на системную размерность используемых физических величин. Использовать систему СИ.
2. По материалам этой темы необходимо решить ряд задач по определению состояния атмосферы.

Задача 1. Найти плотность сухого воздуха при давлении $P = 1000,0$ гПа и температуре $20,0 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Решение. Используем уравнение состояния сухого воздуха: $P = \rho RT$, где P – атмосферное давление (Па); R – удельная газовая постоянная сухого воздуха (287 Дж/кг·К); T – температура воздуха (К).

$$\rho = \frac{1000 \cdot 10^2 \text{ Па}}{287 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1} \cdot 293 \text{ К}} = 1,18 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Задача 2. Температура воздуха $-3,1$ °С, показания смоченного термометра аспирационного психрометра $-5,5$ °С. Давление $1000,0$ гПа. Найти по психрометрическим таблицам парциальное давление водяного пара, относительную влажность, дефицит насыщения; вычислить абсолютную влажность и массовую долю водяного пара.

Решение. Используя психрометрические таблицы, определим парциальное давление водяного пара без учета аспирации и при атмосферном давлении 1000 гПа:

$$e_1 = 2,16 \text{ гПа.}$$

Найдем по психрометрическим таблицам поправку к e_1 для аспирационного психрометра при

$$P = 1000,0 \text{ гПа и } \Delta t = t_{\text{сyx}} - t_{\text{см}} = 2,4 \text{ °С:}$$

$$\Delta e = 0,33 \text{ гПа. Тогда } e = 2,16 + 0,33 = 2,49 \text{ гПа.}$$

Используя табл. 2 психрометрических таблиц, по $t_{\text{сyx}} = -3,1$ °С и $e = 2,49$ гПа находим остальные характеристики влажности:

$$f = 51 \%, d = 2,3 \text{ гПа,}$$

$$a = \frac{0,8 \cdot 2,49}{1 + \frac{3,1}{273}} = 2,01 \text{ г/м}^3$$

$$s = 622 \frac{2,49}{1000} = 1,55$$

Задача 3. Найти плотность влажного воздуха при стандартном атмосферном давлении, температуре сухого термометра $t = 30,0$ °С и температуре смоченного термометра стационарного психрометра $t' = 28,0$ °С.

Решение. Используя психрометрические таблицы, определим парциальное давление водяного пара $e = 36,2$ гПа.

Из уравнения состояния влажного воздуха $P = \rho T_v R$ получим:

$$\rho = \frac{P}{RT \left(1 + \frac{0,378e}{P}\right)}$$

или

$$\rho = \frac{1000 \cdot 10^2}{287 \cdot 303 \cdot \left(1 + 0,378 \cdot \frac{36,2}{1000}\right)} = 1,135$$

кг/м³.

Следует обратить внимание на то, что плотность сухого воздуха при одинаковых с влажным атмосферном давлении и температуре, равнялась бы:

$$\rho_c = 1,149 \text{ кг/м}^3,$$

т.е. при одинаковом атмосферном давлении и температуре плотность сухого воздуха всегда немного больше плотности влажного воздуха.

Задачи для самостоятельного решения

1. Вычислить удельную газовую постоянную сухого воздуха если массовая доля и молярная масса основных его компонентов характеризуются приведенными выше значениями. Найти относительное отклонение найденного R_c от точного значения. Указать возможные причины расхождения. Исходя из точного значения R_c найти молярную массу сухого воздуха. В чем заключается условность последнего понятия?
2. Вычислить плотность сухого воздуха при нормальных условиях (температура $0,0\text{ }^\circ\text{C}$, давление $1013,3\text{ гПа}$). Как и почему изменится ответ, если при данном давлении воздух нагреется или охладится? Если при данной температуре изменится атмосферное давление? Во сколько раз (приблизительно) сухой воздух при обычных условиях легче воды?
3. Найти объем 1 г сухого воздуха при температуре $15,4\text{ }^\circ\text{C}$ и давлении $1010,4\text{ гПа}$. Вычислить диаметр тонкой резиновой оболочки, надутой воздухом и имеющей найденный объем. Рассчитать при этих условиях массу сухого воздуха, заполняющего литровую банку.
4. Вычислить массу сухого воздуха, заполняющего помещение объемом 150 м^3 при температуре $21,7\text{ }^\circ\text{C}$ и давлении $1030,0\text{ гПа}$. Используя значения массовой доли отдельных газов, найти массы азота, кислорода, аргона и углекислого газа в этом помещении. Проверить ответы, используя уравнение состояния каждого газа и значение его объемной доли. Сравнить первый ответ с суммой полученных масс четырех газов.
5. Вычислить вертикальный градиент плотности воздуха на высоте, где плотность составляет $1,0\text{ кг/м}^3$, температура $-23,1\text{ }^\circ\text{C}$, а вертикальный градиент температуры $0,65\text{ }^\circ\text{C}/100\text{ м}$. Найти значение

вертикального градиента температуры, при превышении которого плотность воздуха возрастает с высотой.

Указание. Условно считая воздух сухим, продифференцировать по высоте с использованием основного уравнения статики атмосферы.

Вопросы для самопроверки

1. Давление воздуха 1000 гПа. Как перевести эту величину в мм. рт. ст.?
2. Дайте определение всех характеристик влажного воздуха.
3. Как пользоваться психрометрической таблицей?
4. Каков газовый состав воздуха у земли?
5. Каков газовый состав воздуха на высотах, больших 100 км?
6. Каков физический смысл величин универсальной и удельной газовой постоянной?
7. Каков физический смысл виртуальной температуры T_v ?
8. Как связана плотность влажного воздуха ρ_m с температурой, если водяной пар насыщен?
9. Каковы основные свойства тропосферы?
10. Каковы основные свойства стратосферы?

Критерии оценивания выполненной работы:

Правильность решения задачи.

Полнота выполнения задания.

Знание формул выражающих математические зависимости физических величин.

Лабораторная работа №2

Характеристики влажности воздуха и связь между ними

Цель: формирование осознанного использования характеристик влажности воздуха при анализе физических процессов, развивающихся в атмосфере. Освоение приемов перехода от одних характеристик к другим, понимание их взаимосвязи.

Материалы для работы:

1. Психрометрические таблицы.
2. Сборник задач и упражнений по метеорологии.
3. Миллиметровая бумага.
4. Компьютер.

Вода единственное в атмосфере вещество, которое при наблюдающихся на Земле условиях может находиться в трех агрегатных состояниях – жидком, твердом и газообразном. Для оценки содержания водяного пара в воздухе и его состояния используют различные характеристики, которые условно можно разделить на две группы. Одна из них позволяет судить о количестве водяного пара в воздухе, вторая о близости пара к состоянию насыщения.

К первой группе относятся:

1. **Парциальное давление водяного пара e (гПа)** – это та часть атмосферного давления, которая создается водяным паром. Чем больше пара в воздухе, тем, больше парциальное давление.

2. **Давление насыщения E .** В воздухе не может в газообразном состоянии содержаться произвольно большое количество водяного пара. При достижении при данной температуре определенного парциального давления пар становится насыщенным, т.е. начинается процесс перехода его в жидкое или твердое состояние. Максимально возможное парциальное давление при данной температуре называют давлением насыщения E (гПа). При $e > E$ происходит конденсация водяного пара. Теоретически и эмпирически установлены зависимости давления насыщения над плоской поверхностью дистиллированной воды лишенной электрического заряда от температуры воздуха:

Над водой

$$E = 6,1 \cdot 10^{\frac{8,61t}{273+t}}$$

над льдом

$$E = 6,1 \cdot 10^{\frac{9,76t}{273+t}} .$$

Значения температуры в формулах используются в $^{\circ}\text{C}$.

3. **Абсолютная влажность воздуха** – это масса водяного пара в 1 м^3 воздуха (плотность пара).

$$a = 217 \frac{e}{T} \quad \text{г/м}^3.$$

4. **Массовая доля пара S** – масса пара в 1 кг влажного воздуха, выражается в г/г или г/кг, т.е. в промилях ($^{\circ}/_{00}$)

$$S = 622 \frac{e}{p - 0,378e} \quad \text{г/кг}.$$

Ко второй группе относятся:

1. **Относительная влажность воздуха** f – это отношение парциального давления водяного пара к давлению насыщения, выраженное в %.

$$f = \frac{e}{E} \cdot 100\%.$$

2. **Дефицит насыщения** d , т. е. разность $d = E - e$ (при $f = 100\%$, очевидно, $d = 0$).

3. **Точка росы** t_d , т.е. температура, до которой, при неизменном давлении воздуха, нужно понизить температуру воздуха, чтобы содержащийся в нем пар стал насыщенным, ($e = E$; f при этом равно 100%).

Для определения всех характеристик влажности воздуха необходимо парциальное давление водяного пара e , его значение можно определить по психрометрической формуле

$$e = E' - A(t - t')p,$$

где E' – давление насыщения пара при температуре смоченного термометра, t – температура сухого термометра, t' – температура смоченного термометра, p – атмосферное давление, A – коэффициент, зависящий от скорости ветра. Для стационарного психрометра $A = 0,0007947$, для аспирационного психрометра $A = 0,000662$. На практике для определения влажности воздуха пользуются психрометрическими таблицами.

Примеры.

1. Определить давление насыщения над плоской поверхностью воды при температуре 15°C .

Решение.

Над водой

$$E = 6,1 \cdot 10^{\frac{8,61t}{273+t}}$$

Подставляя в формулу значение получаем

$$E = 6,1 \cdot 10^{\frac{8,61 \cdot 15}{273+15}}$$

или $E=6,1 \cdot 10^{2,81}=17,1$ гПа.

2. Определить парциальное давление водяного пара, если относительная влажность 40%, а дефицит насыщения 5гПа.

Решение.

Используем формулы $f = \frac{e}{E} \cdot 100\%$ и $d = E - e$. Из них следует, что $e = \frac{f}{100} E$ и $E=d+e$. Отсюда $e = \frac{f}{100} (e + d)$, $e = \frac{40}{100} (e + 5)$, $e=0,4e+0,4 \cdot 5$. В итоге получаем $0,6e=2$ или $e=3,3$ гПа.

3. Определить сколько граммов водяного пара содержится в 1 кг влажного воздуха, если парциальное давление водяного пара 16,2 гПа, а атмосферное давление 1010,0 гПа.

Решение. В задаче требуется определить массовую долю водяного пара, которая определяется формулой

$$S = 622 \frac{e}{P - 0,378e}$$

Подставляя заданные значения, имеем

$$S = 622 \frac{16,2}{1010 - 0,378 \cdot 16,2} = 9,9 \text{ г/кг}$$

4. Насколько нужно охладить влажный воздух, имеющий температуру 10°C и парциальное давление водяного пара 8 гПа , чтобы пар в нем стал насыщенным?

Решение.

Из формулы для давления насыщения выразить температуру, при которой выполняется равенство:

$$t = \frac{(\log E - \log 6,1) \cdot 273}{8,61 - \log E + \log 6,1}$$

Вместо E используем e и определяем температуру при которой водяной пар в воздухе может стать насыщенным. выполнив вычисления получаем $3,8^{\circ}\text{C}$. Для того, чтобы достичь такой температуры, необходимо понизить температуру воздуха на $6,2^{\circ}\text{C}$.

5. Определить относительную влажность и дефицит влажности, если показания сухого термометра в психрометрической будке $20,0^{\circ}$, смоченного термометра $15,0^{\circ}$, а атмосферное давление равно 1000 гПа .

Решение.

Упругость насыщающего пара при $t = 15,0^{\circ}$ равна $17,04 \text{ гПа}$.

По формуле $e = E' - 0,0007947 (t - t') p$

находим $e = 17,04 - 0,0007947(20 - 15)1000 = 13,09 \text{ гПа}$.

Упругость насыщающего пара при $t=20,0^\circ$, равна 23,37 гПа, тогда

$$f = \frac{1313,09}{23,37} 100 = 56 \%$$

$$d=23,37-13,09=10,28 \text{ гПа.}$$

Задачи для самостоятельного решения:

1. Температура воздуха $16,7^\circ\text{C}$, парциальное давление водяного пара 12,1 гПа. Найти дефицит насыщения. Как и почему он изменится, если при данной температуре увеличится (уменьшится) парциальное давление водяного пара? Если при данном парциальном давлении пара повысится (понижится) температура воздуха? В каких пределах может изменяться дефицит насыщения? Может ли он быть отрицательным? Как различается дефицит насыщения над льдом и над водой при одной и той же отрицательной температуре?
2. Температура воздуха $-4,2^\circ\text{C}$, парциальное давление водяного пара 1,54 гПа. Найти дефицит насыщения.
3. Температура воздуха $12,4^\circ\text{C}$, дефицит насыщения 4,7 гПа. Найти парциальное давление водяного пара и давление насыщенного водяного пара.
4. Вычислить относительную влажность, если при температуре $14,4^\circ\text{C}$ парциальное давление водяного пара равно 0,0; 4,1; 8,2; 12,3; 16,4 гПа. Первое или последнее из найденных значений чаще встречается в природе?

5. Найти относительную влажность, если дефицит насыщения равен:
а) давлению насыщенного водяного пара; б) 0,0 гПа. Указать предельные значения относительной влажности, если не учитывать возможность пересыщения пара. Какое из найденных предельных значений чаще встречается в природе?
6. Температура воздуха $-3,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, парциальное давление водяного пара 1,70 гПа. Вычислить относительную влажность. Как и почему она изменится, если при той же температуре парциальное давление водяного пара увеличится (уменьшится)? Если при том же его парциальном давлении температура повысится (понижится)? При повышении или при понижении температуры воздуха содержащийся в нем водяной пар с заданным парциальным давлением приближается к состоянию насыщения?
7. Температура воздуха $-8,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, относительная влажность 74 %. Найти давление насыщенного водяного пара, парциальное давление водяного пара, находящегося в воздухе, и дефицит насыщения.
8. До какой температуры должен изобарически охладиться воздух, чтобы содержащийся в нем пар стал насыщенным, если начальная температура воздуха $13,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ и дефицит насыщения 4,2 гПа? Как и почему изменится ответ, если при той же начальной температуре дефицит насыщения будет больше (меньше) заданного? Если при данном дефиците насыщения повысится (понижится) начальная температура воздуха?
9. Станет ли насыщенным водяной пар, содержащийся в воздухе, если вечером температура и относительная влажность составляли 14,9

$^{\circ}\text{C}$ и 63% соответственно, а к утру температура понизилась до $6,7^{\circ}\text{C}$, причем атмосферное давление осталось неизменным? Какой процесс может начаться при таких условиях? Что появится в воздухе? Какое практическое значение может иметь решение подобных задач? Какими двумя способами можно решить задачу? Изменится ли ответ, если при тех же температурах начальная относительная влажность будет больше (меньше) заданной? Если начальная (конечная) температура будет больше (меньше) заданной, а остальные величины не изменятся?

10. Температура воздуха $26,4^{\circ}\text{C}$, точка росы $9,3^{\circ}\text{C}$. Найти парциальное давление водяного пара, давление насыщенного водяного пара, дефицит насыщения и относительную влажность. Как и почему изменятся ответы, если при той же температуре точка росы будет выше (ниже) заданной? Если при данной точке росы температура воздуха будет выше (ниже) заданной?

11. Температура воздуха $7,2^{\circ}\text{C}$, парциальное давление водяного пара $4,7\text{ гПа}$. Вычислить абсолютную влажность. Как и почему она изменится, если при данном парциальном давлении водяного пара температура повысится (понижится)? Если при данной температуре парциальное давление пара увеличится (уменьшится)? При изменении какой величины — температуры воздуха или парциального давления пара — абсолютная влажность изменяется больше?

12. При температуре $0,0^{\circ}\text{C}$ в 1 м^3 воздуха содержится $4,0\text{ г}$ водяного пара. Найти его парциальное давление.

13. Найти температуру воздуха, при которой абсолютная влажность (г/м^3) численно равна парциальному давлению водяного пара (гПа).

14. Вычислить массу воды, которая образуется, если сконденсировать весь водяной пар в изолированном помещении площадью 30 м^2 и высотой 3 м , в котором температура воздуха равна $15,6 \text{ }^\circ\text{C}$, а относительная влажность — 74% . Как и почему изменится ответ, если при заданной температуре относительная влажность увеличится (уменьшится)? Если при заданной относительной влажности температура повысится (понижится)? Температуру воздуха во время конденсации пара считать постоянной.

15. В тропических пустынях температура воздуха иногда поднимается до $45,0 \text{ }^\circ\text{C}$ (и выше), а относительная влажность при этом уменьшается до 2% . В полярных же районах возможна температура $-40,0 \text{ }^\circ\text{C}$ (и ниже) при относительной влажности 100% . В каком случае абсолютная влажность больше и во сколько раз? Можно ли, зная только относительную влажность, определить массу водяного пара, содержащегося в воздухе?

16. Найти наибольшую массу водяного пара, которая может содержаться в 1 м^3 воздуха при температурах $20,0$ и $-20,0 \text{ }^\circ\text{C}$. Во сколько раз первое значение больше второго? Возможность пересыщения пара в данном случае не учитывать.

17. Температура воздуха $23,7 \text{ }^\circ\text{C}$, абсолютная влажность $14,1 \text{ г/м}^3$. Найти парциальное давление водяного пара, давление насыщенного пара, дефицит насыщения, относительную влажность и точку росы.

18. Парциальное давление водяного пара 10,0 гПа, атмосферное давление 1000,0 гПа. Найти массовую долю водяного пара. Как и почему она изменится, если при данном атмосферном давлении парциальное давление пара увеличится (уменьшится)? Если при данном парциальном давлении пара изменится атмосферное давление?

19. Температура воздуха 12,7 °С, давление 974,2 гПа, относительная влажность 42 %. Найти массовую долю водяного пара. Как и почему она изменится, если при остальных неизменных условиях относительная влажность увеличится (уменьшится)?

20. Найти предельные значения массовой доли водяного пара при температуре воздуха 11,4°С и атмосферном давлении 981,4 гПа. Какое из них чаще встречается в природе? Возможность пересыщения пара в данном случае не учитывать.

21. Температура воздуха —7,1 °С, давление 993,9 гПа, массовая доля водяного пара 0,2 ‰. Найти парциальное давление водяного пара, дефицит насыщения, относительную влажность, точку росы и абсолютную влажность.

Критерии оценивания выполненной работы:

Правильность решения задачи.

Полнота выполнения задания.

Знание формул, выражающих математические зависимости физических величин.

Лабораторная работа № 3

Основы статики атмосферы

Цель работы – отработка навыков использования барометрических формул для определения атмосферного давления на произвольных высотах при различных состояниях атмосферы, расчет превышения одного пункта над другим, оценка мощности облачного слоя.

Материалы для работы:

Матвеев Л.Т. Физика атмосферы – СПб.: Гидрометеиздат, 2008.

Методические рекомендации:

1. Изучить соответствующие разделы и усвоить основные формулы, выражающие зависимости физических величин.

В этой работе изучается вывод и анализ основного уравнения статики атмосферы $dP = -\rho g dz$. Важно отметить, что хотя заголовок темы и предполагает отсутствие движения в атмосфере, уравнение статики справедливо и для атмосферных условий, когда имеет место движение воздуха. Наибольшее значение имеет интегрирование этого уравнения по высоте, т. е. определение вида зависимости $P(z)$. Оно производится путем задания функции $p(z)$ или $T(z)$ для однородной ($\rho(z) = \text{const}$), изотермической $T(z) = \text{const}$ и политропной ($\gamma = -\frac{dT}{dz} = \text{const}$) атмосфер. Полная барометрическая формула Лапласа позволяет найти наиболее близкий к реальному вид функции $P(z)$. Полезно обратить внимание на понятие высоты однородной атмосферы H для различных газов, так как она зависит от молекулярного веса газа.

Необходимо рассмотреть связь между барометрической ступенью и средней температурой внутри исследуемого слоя воздуха.

1. Особое внимание обратить на системную размерность используемых физических величин. Использовать систему СИ.
2. Решить несколько задач по этой теме.

Задача 1. Определить высоту однородной атмосферы сухого воздуха если $P_0 = 1013,2$ гПа, $t = 0,0$ °С. Широта места $\varphi = 45^\circ$.

Решение. Запишем барометрическую формулу для однородной атмосферы

$$P_2 = P_1 - \rho g(z_2 - z_1),$$

где P_1, P_2 — давление на высотах z_1 и z_2 .

Приняв за верхнюю границу атмосферы ту высоту H , где $P_2 = 0,0$ гПа, найдем

$$(z_2 - z_1) = H = \frac{RT}{g} = \frac{287 \cdot 273}{9,8} = 7998 \text{ м} \approx 8000 \text{ м}.$$

Задача 2. Найти атмосферное давление в изотермической атмосфере на высоте 8000 м, при $P_0 = 1013,2$ гПа, $t = 0,0$ °С.

Решение. Из барической формулы для изотермической атмосферы следует:

$$P_z = P_0 \exp\left(-\frac{gz}{RT}\right)$$

Отсюда в изотермической атмосфере на высоте 8000 м $P_z = 372,5$ гПа.

Таким образом, атмосферное давление в изотермической атмосфере уменьшается с высотой медленнее, чем в однородной атмосфере.

Задача 3. В районе экватора ($\varphi = 0^\circ$) на двух метеорологических станциях, находящихся на разных высотах, одновременно измерены:

Высота	T °C	P гПа	f %
z_1	22,0	973,5	56
z_2	16,9	931,4	50

Определить превышение верхней станции над нижней $\Delta z = z_2 - z_1$ с ошибкой не более 0,3%.

Решение. При использовании полной барометрической формулы в пределах тропосферы без поправки на зависимость силы тяжести от высоты, допускаемая ошибка в определении высоты станции не превысит 0,3%. Тогда

$$z_2 - z_1 = 18400 \left(1 + \frac{\bar{t}}{273} \right) \left(1 + 0,378 \frac{\bar{e}}{P} \right) (1 + 0,00264 \cos 2\varphi) \lg \left(\frac{P_1}{P_2} \right)$$

Находим:

$$\bar{t} = \frac{22,0 + 16,9}{2} = 19,4$$

$$e_1 = \frac{fE_1}{100} = \frac{56 \cdot 26,4}{100} = 14,8$$

$$e_2 = \frac{f_2 E_2}{100} = \frac{50 \cdot 19,3}{100} = 9,7$$

$$\frac{e_1}{P_1} = \frac{14,8}{973,5} = 0,0152$$

$$\frac{e_2}{P_2} = \frac{19,7}{9931,4} = 0,0104$$

$$\overline{e/P} = 0,0128$$

$$z_2 - z_1 =$$

$$18400 \left(1 + \frac{19,4}{273}\right) (1 + 0,378 \cdot 0,0128)(1 + 0,00264) \lg \left(\frac{973,5}{931,4}\right) = 381,2 \text{ м.}$$

Точный ответ:

$$z_2 - z_1 = (381,2 \pm 1) \text{ м.}$$

Вертикальный градиент давления и барическая ступень

Вертикальный градиент давления (G) в метеорологии обычно выражается в гектопаскалях на 100 м с точностью до десятых. Из основного уравнения статики при нормальном ускорении свободного падения получаем

$$G = 3,42p/T,$$

где p выражается в гПа, T — в К.

Барическая ступень (h) выражается в м/гПа с точностью до десятых и вычисляется по формуле

$$h = 100/G$$

или по формуле

$$h = \frac{7995}{p} (1 + \alpha t),$$

где α — объемный коэффициент теплового расширения газов ($3,66 \cdot 10^{-3}$).

Изменение атмосферного давления и плотности воздуха с высотой.

Зависимость изменения атмосферного давления от плотности воздуха, ускорения силы тяжести и толщины слоя атмосферы выражается основным уравнением статики $\Delta p = -\rho g \Delta z$, где Δp — изменение давления при изменении высоты на Δz ; ρ — средняя плотность воздуха в слое Δz ; g — ускорение силы тяжести.

Зависимость силы тяжести от широты и высоты места над уровнем моря выражается формулой $g = g_{45} (1 - 0,0026 \cos^2 \varphi) (1 - 0,314 \cdot 10^{-6} h)$, где g — сила тяжести для данного места; g_{45} — сила тяжести на широте 45° и h — высота места над уровнем моря.

Пример. На сколько изменится атмосферное давление с высотой в стометровом слое воздуха на широте 30° при температуре $273,0^\circ \text{K}$ и атмосферном давлении $1013 \cdot 10^2 \text{ н/м}^2$?

Решение. Плотность воздуха при нормальных условиях равна $0,001293 \text{ г/см}^3$, $g = 980,6 (1 - 0,0026 \cos^2 60^\circ) = 980,6 (1 - 0,0026 \cdot 0,5) = 979,3 \text{ см/сек}^2$.

$\Delta p = 0,001293 \cdot 979,3 \cdot 10000 = 12658 \text{ дин/см}^2 = 12,7 \text{ мб}$.

Однородная атмосфера

Если плотность воздуха в атмосфере с высотой не меняется, то атмосферу называют однородной. Высота однородной атмосферы H выражается следующей формулой:

$$H = \frac{RT}{g}$$

Пример. Определить высоту однородной атмосферы при нормальных условиях, т.е. при температуре 0° и нормальной силе тяжести $9,806 \text{ м/сек}^2$.

Решение.

$$H_0 = \frac{2,87 \cdot 10^6 \text{ эрг/г} \cdot \text{град} \cdot 273^{\circ}}{980,6 \text{ см/сек}^2} = 7991 \text{ м.}$$

Для атмосферы с температурой t° , отличающейся от 0° , формула имеет вид $H_t = 7991(1 + \alpha t)$.

Изотермическая атмосфера

Если температура атмосферы с высотой остается постоянной, то атмосфера называется изотермической. Барометрическая формула для изотермической атмосферы имеет вид:

$$h = 18400(1 + \alpha t) \lg \frac{p_0}{p_h}$$

где p_0 - давление у поверхности земли, p_h - давление на высоте h .

Пример. На уровне моря давление $1010,0 \text{ мб}$, температура $25,0^{\circ}$. Определить высоту станции над уровнем моря, если атмосферное давление на ней $950,0 \text{ мб}$ и $\gamma = 0^{\circ}/100 \text{ м}$.

Решение. $Z = 18400(1 + 0,004 \cdot 25^{\circ}) \lg \frac{1010}{950} = 18400 \cdot 1,1 \cdot 0,0266 = 538,4 \text{ м.}$

Формула Лапласа

Для более точных подсчетов с учетом влияния на атмосферное давление влажности и ускорения силы тяжести применяется формула Лапласа, которая имеет следующий вид:

$$h=18400(1+\alpha t)(1+0,378\frac{e}{p})(1+0,0026\cos 2\varphi)(1+\beta z)\lg\frac{p_0}{p_h},$$

где h - превышение одного пункта над другим; множители $(1+0,0026\cos 2\varphi)$ и $(1+\beta z)$ характеризуют изменение силы тяжести в зависимости от изменения широты и высоты места над уровнем моря; e - средняя упругость водяного пара воздушного столба между нижним и верхним пунктами; p - среднее давление этого столба воздуха; φ - широта места наблюдений; β - коэффициент, равный $0,314 \cdot 10^{-6}$ (для свободной атмосферы) и $0,196 \cdot 10^{-6}$ (для горных местностей); z - высота над уровнем моря середины рассматриваемого столба воздуха; при небольших разностях давления значение βz очень мало, поэтому двучлен $1+\beta z$ можно принять равным единице.

Пример. В двух пунктах, расположенных на широте 30^0 в горной местности, отмечались следующие значения метеорологических элементов: в первом - давление 1030,0 мб, температура $23,3^0$, упругость водяного пара 12,7 мб; во втором- давление 950,0 мб, температура $16,7^0$, упругость водяного пара 7,3 мб. Каково превышение одного пункта над другим?

Решение.

$$t_{cp}=\frac{23,3+16,7}{2}=20,0^0,$$

$$e_{cp}=\frac{12,7+7,3}{2}=10,0 \text{ мб},$$

$$p_{cp}=\frac{1030,0+950,0}{2}=990,0 \text{ мб},$$

$$h=18400(1+0,004 \cdot 20)(1+0,378 \frac{10}{990})(1-0,0026 \cos 60^{\circ}) \cdot$$

$$\cdot 1g \frac{1030}{950}=18400 \cdot 1,08 \cdot 1,004 \cdot 1,001 \cdot 0,0351=700,8 \text{ м.}$$

Формула Бабине

Для небольших разностей высот между двумя уровнями в атмосфере используют приближенную формулу Бабине, которая имеет вид

$$h=800 \frac{2(p_H-p_B)}{p_H+p_B}(1+\alpha t),$$

где p_H - давление на нижнем уровне; p_B - давление на верхнем уровне и h - превышение одного пункта над другим.

Пример. У поверхности земли температура воздуха равнялась $12,0^{\circ}$ при атмосферном давлении $980,0$ мб, а на некоторой высоте в точке А температура составляла $8,0^{\circ}$ при давлении $920,0$ мб. Каково превышение точки А над земной поверхностью?

Решение.

$$t_p = \frac{12,0+8,0}{2} = 10,0^{\circ},$$

$$h=8000 \frac{2(980-920)}{980+920}(1+0,004 \cdot 10)=525 \text{ м.}$$

Барическая ступень

Барической ступенью называется высота, на которую нужно подняться или опуститься, чтобы давление изменилось на 1 мб. Для определения барической ступени пользуются формулой

$$h' = \frac{8000}{p}(1+at),$$

где h' - величина барической ступени, выраженная в метрах.

Пример. На метеорологической станции, высота которой 200 м, давление равно 1000,0 мб, а температура 10,0°. Вычислить давление на уровне моря.

Решение.

1. Определяем величину барической ступени.

$$h' = \frac{8000}{1000}(1+0,004 \cdot 10)=8,3 \text{ м/мб.}$$

2. Находим приближенно давление на уровне моря.

$$p=1000 + \frac{200}{8,3}=1024,0 \text{ мб.}$$

3. Определяем среднее значение давления между верхним и нижним уровнями.

$$p = \frac{1000,0+1024,0}{2} = 1012,0 \text{ мб.}$$

4. Среднюю температуру столба воздуха определяем, предположив, что вертикальный температурный градиент равен 0,6°/100 м. Очевидно, на высоте 100 м (середина слоя) температура будет равняться 10,6°.

$$h' = \frac{8000}{1012}(1+0,004 \cdot 10,6)=8,2 \text{ м/мб,}$$

$$p=1000 + \frac{200}{8,2}=1024,4 \text{ мб.}$$

Величина, характеризующая падение давления на 100 м высоты, называется вертикальным барическим градиентом.

$$G_{\text{в}}=-\frac{\Delta p \cdot 100}{\Delta z},$$

где $G_{\text{в}}$ - вертикальный градиент давления; Δp - изменение давления при изменении высоты на Δz м.

Пример. У земной поверхности атмосферное давление равно 1000,0 мб при температуре $10,0^{\circ}$, а на некоторой высоте давление на 50,0 мб ниже. Каково значение вертикального градиента давления при условии изотермического распределения температуры?

Решение. Находим толщину слоя.

$$h=18400 \lg \frac{1000}{950} (1+0,004 \cdot 10)=18400 \cdot 1,04 (\lg 100 - \lg 95)=426,7 \text{ м,}$$

$$G_{\text{в}}=-\frac{(-50) \cdot 100}{426,7}=11,7 \text{ мб/100м.}$$

Задачи для самостоятельного решения:

1. Сравнить вертикальный градиент давления у поверхности Земли при температуре $-11,9^{\circ}\text{C}$ и давлении 1045,0 гПа (G_0) с его значением на высоте, где температура равна $-38,8^{\circ}\text{C}$ и давление 468,7 гПа (G_z). Как и почему изменяется вертикальный градиент давления с высотой? Что можно на этом основании, сказать о характере изменения самого давления с высотой? Представить схематически график изменения давления с высотой.

2. Вычислить вертикальный градиент давления на высоте, на которой атмосферное давление равно 1000,0 гПа и температура 0,0 °С. На сколько гПа уменьшается атмосферное давление на каждые 100 м высоты при обычных условиях у земной поверхности?
3. В двух пунктах, первый из которых находится на экваторе, а второй в Арктике, на уровне моря были получены одновременно одинаковые значения давления — 990,0 гПа. Температура в первом пункте равна 27,0 °С, а во втором — 23,0 °С. Условно считая, что вертикальный градиент давления не изменяется с высотой, приближенно определить в этих пунктах давление на высоте 5 км. В холодном или теплом воздухе при остальных одинаковых условиях давление быстрее уменьшается с высотой? В каком общем направлении перемещается воздух на высоте 5 км?
4. У подножия горы высотой 3 км средние значения давления в один из зимних и в один из летних месяцев оказались одинаковыми — 1000,0 гПа. Средняя температура воздуха у подножия горы в эти месяцы составила соответственно —13,0 и 17,0 °С. Условно считая, что вертикальный градиент давления не меняется с высотой, вычислить среднее давление в указанные месяцы на вершине горы. Построить схему годового хода давления в высокогорных районах.
5. Вычислить барическую ступень у поверхности Земли при давлении 1000,0 гПа и температурах —40,0; 0,0 и 40,0 °С. На сколько метров надо переместиться по вертикали вблизи земной поверхности при обычных условиях, чтобы давление изменилось на 1 гПа? Летом или зимой, днем или ночью давление быстрее уменьшается с высотой?
6. Вычислить барическую ступень, если вертикальный градиент давления составляет 8,0 гПа/100 м.
7. Сравнить барическую ступень на высоте, где температура равна —30,0 °С и давление 500,0 гПа (h_z), с ее значением у поверхности

Земли при температуре $0,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давлении $1000,0\text{ гПа}$ (h_0). Как изменяется барическая ступень с высотой? Что можно на этом основании сказать о характере изменения самого давления с высотой? Представить схематически график изменения давления с высотой.

Вопросы для самопроверки

1. Как меняется давление воздуха с высотой? В чем физический смысл уравнения статики? Где быстрее падает давление: при подъеме на 1 км от земли или при подъеме от 2 км до 3 км? Почему?
2. Как меняется давление с высотой в однородной атмосфере? Чему равна ее высота? От чего она зависит?
3. Где располагается высота политропной атмосферы? От чего она зависит? Где располагается высота изотермической атмосферы?
4. Какие метеорологические и геофизические величины входят в полную барометрическую формулу? Как они вычисляются?
5. Рассчитайте барическую ступень и барический градиент у земли, если $T=273\text{ }^{\circ}\text{K}$, а $P_0=1000\text{ гПа}$.

Критерии оценивания выполненной работы:

Правильность решения задачи.

Полнота выполнения задания.

Знание формул выражающих математические зависимости физических величин.