

Б. М. ДЖУМАН

АДИАБАТИЧЕСКИЙ ГРАДИЕНТ ТЕМПЕРАТУРЫ ВО ВЛАЖНОМ НЕНАСЫЩЕННОМ ВОЗДУХЕ

Исследуем изменение температуры в адиабатически поднимающейся частице влажного ненасыщенного воздуха в земной атмосфере. Воспользуемся уравнением первого начала термодинамики [3]

$$dq = du_c + du_n + dw, \quad (1)$$

где q — количество теплоты; u_c — внутренняя энергия сухого воздуха; u_n — внутренняя энергия водяного пара; dw — работа расширения газа.

Сухой воздух и водяной пар в земной атмосфере можно считать идеальным газом, поэтому записываем

$$u_c = C_{vc}T + \text{const}; \quad (2)$$

$$u_n = C_{vn}T + \text{const}. \quad (3)$$

Здесь C_{vc} и C_{vn} — удельные теплоемкости при постоянном объеме сухого воздуха и водяного пара.

Для смеси газов, т. е. для влажного ненасыщенного воздуха, имеем

$$u = u_c + u_n = C_{vc}(1 - s)T + C_{vn}sT + \text{const}, \quad (4)$$

где s — удельная влажность.

Выражая удельную влажность через упругость водяного пара [3]

$$s = \frac{0,622 e}{P - 0,378 e}, \quad (5)$$

где P — давление смеси; e — парциальное давление (упругость) водяного пара, после преобразований, перепишем (4) в виде

$$u = \left[C_{vc} + (C_{vn} - C_{vc}) \frac{0,622 e}{P - 0,378 e} \right] T + \text{const}. \quad (6)$$

Дифференцируя (6), имеем

$$\begin{aligned} du &= \left[C_{vc} + (C_{vn} - C_{vc}) \frac{0,622 e}{P - 0,378 e} \right] dT + \\ &+ 0,622(C_{vn} - C_{vc})T \frac{Pde - edP}{(P - 0,378 e)^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Найдем третье слагаемое правой части формулы (1) и запишем работу расширения смеси в виде

$$dw = APdv, \quad (8)$$

где A — тепловой эквивалент работы; dv — приращение объема.

Дифференцируя уравнение состояния влажного ненасыщенного воздуха

$$Pdv + vdp = R_c T (1 + 0,608 s),$$

имеем

$$Pdv + vdp = R_c (1 + 0,608 s) dT + R_c T \cdot 0,608 ds. \quad (9)$$

Подставляя в (9)

$$ds = \frac{0,622 (Pde - edP)}{(P - 0,378 e)^2},$$

после преобразований получаем

$$\begin{aligned} Pdv &= \left(1 + \frac{0,378 e}{P - 0,378 e}\right) R_c dT + \\ &+ \frac{0,378 (Pde - edP)}{(P - 0,378 e)^2} R_c T - vdp. \end{aligned} \quad (10)$$

На основании (7) и (10), а также учитывая, что $AR_c = C_{pc} - C_{vc}$, имеем

$$\begin{aligned} dw &= \left[\left(1 + \frac{0,378 e}{P - 0,378 e}\right) dT + \frac{0,378 (Pde - edP)}{(P - 0,378 e)^2} T\right] \times \\ &\times (C_{pc} - C_{vc}) - Avdp. \end{aligned} \quad (11)$$

Подставляя (11) и (7) в (1), после преобразований записываем

$$\begin{aligned} dq &= \frac{[C_{pc} P (C_{vc} - 0,622 C_{in} e) dT]}{P - 0,378 e} + \\ &+ \frac{0,378 C_{pc} - C_{vc} + 0,622 C_{in}}{(P - 0,378 e)^2} T (Pde - edP) - Avdp. \end{aligned} \quad (12)$$

Заменяя дифференциалы метеорологических элементов через вертикальные градиенты и подставляя значения удельных теплоемкостей $C_{pc} = 1,006$, $C_{vc} = 0,718$ для сухого воздуха и $C_{in} = -1,912$, $C_{in} = 1,450$ для водяного пара [2, 4], формулу (12) представим в виде

$$\begin{aligned} \frac{dq}{dh} &= \frac{P + 0,183 e}{P - 0,378 e} \frac{dT}{dh} + \frac{0,561 TP}{(P - 0,378 e)^2} \frac{de}{dh} - \\ &- \left[\frac{0,561 Te}{(P - 0,378 e)^2} - \frac{Av}{C_{pc}} \right] \frac{dP}{dh}. \end{aligned} \quad (13)$$

Принимая во внимание, что при адиабатическом процессе $\frac{dq}{dh} = 0$ и подставляя $\frac{dP}{dh} = -g\rho$ в (13), получаем

$$\frac{P + 0,183 e}{P - 0,378 e} \frac{dT}{dh} = -\frac{Ag}{C_{pc}} - \frac{0,561 eP}{(P - 0,378 e)^2} \gamma_A - \frac{0,561 TP}{(R - 0,378 e)^2} \frac{de}{dh}. \quad (14)$$

Здесь $\gamma_A = g/R_c = 0,0342$ К/м.

Пренебрегая в (14) величинами малого порядка, формула адиабатического градиента температуры принимает вид

$$\frac{dT}{dh} \approx \gamma_a - \frac{0,56}{P} \frac{T de}{dh}, \quad (15)$$

где $\gamma_a = 0,0098 \text{ К/м}$ — сухоадиабатический градиент.

Заметим, что в [1] получена несколько другим путем аналогичная формула для равновесного градиента температуры.

Значения средних вертикальных градиентов влажности, гПа/м

e, гПа	Высоты над подстилающей поверхностью, м				
	0—50	50—100	100—200	200—300	300—500
7	0,011	0,007	0,006	0,005	0,004
14	0,022	0,014	0,010	0,008	0,006
21	0,032	0,20	0,017	0,014	0,010

Из (15) следует, что вертикальный адиабатический градиент температуры во влажном ненасыщенном воздухе не является практически постоянным, как это принято было считать в физике атмосферы до настоящего времени, а может изменяться в значительных пределах в зависимости от изменения градиента влажности, температуры и давления. При этом основное влияние на изменение его значения оказывает градиент влажности.

Для оценки изменения значений адиабатического градиента температуры использованы материалы метеорологического зондирования атмосферы в районах Днепропетровска, Ташкента, Долгопрудного, Воейкова, Махталы и Голодной степи.

В таблице приведены средние градиенты влажности для различных высотных интервалов пограничного слоя атмосферы в летний теплый период года в периоды, близкие к нейтральной температурной стратификации.

На основании данных таблицы получаем эмпирическую зависимость вертикального градиента влажности от высоты:

$$\frac{de}{dh} = -0,0055 e_0 h^{-\frac{1}{2}}, \quad (16)$$

где e_0 — упругость водяного пара у поверхности земли.

По (16) и (15) рассчитываем для различных температур и $P=1000 \text{ гПа}$ при упругости водяного пара, близкой к насыщению ($e_0 \approx E$), градиенты влажности на высоте $h=1 \text{ м}$ $\left(\frac{de}{dh}\right)_0$ и градиенты температуры для разных высот над поверхностью земли $\left(\frac{dT}{dh}\right)_{h,m}$:

T, K	270	280	290	300
$e_0, \text{ гПа}$	6	12	23	40
$(de/dh)_0$	-0,033	-0,066	-0,126	-0,220
$(dT/dh)_1$	-0,0048	-0,0003	-0,0106	-0,0272
$(dT/dh)_{25}$	-0,0088	-0,0078	-0,0058	-0,0024
$(dT/dh)_{100}$	-0,0093	-0,0088	-0,0078	-0,0061
$(dT/dh)_{400}$	-0,0096	-0,0093	-0,0088	-0,0080

Из приведенных данных следует, что адиабатический вертикальный градиент температуры во влажном ненасыщенном воздухе пограничного слоя атмосферы изменяется от положительных значений, по абсолютной величине в несколько раз превышающих сухоадиабатический градиент, до значений $\gamma_a \approx -0,0098$. Отметим, что при инверсии влажности его значение может быть меньше γ_a .

1. Джуман Б. М. Теория вертикальной рефракции при нейтральной температурной стратификации // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. 1988. Вып. 47. С. 86—91.
2. Дубровский И. М., Егоров Б. А., Рябошанка К. П. Справочник по физике. К., 1986.
3. Матвеев Л. Т. Основы общей метеорологии. Физика атмосферы. Л., 1985.
- Флигль Р., Бузингер Дж. Введение в физику атмосферы. М., 1965.