

Первое начало термодинамики применительно к атмосфере

Удельный объем

$$v = 1/\rho$$

Первое начало термодинамики

$$dq = du_i + dw_i.$$

$$du_i = c_v dT_i$$

$$dw_i = p dv_i,$$

**Первое начало термодинамики для воздуха,
рассматриваемого как идеальный газ**

$$dq = c_v dT_i + p dv_i.$$

Уравнение состояния воздуха

$$p v_i = R_c T_i,$$

$$pdv_i + v_i dp = R_c dT_i,$$

$$pdv_i = R_c dT_i - v_i dp.$$

$$dq = (c_v + R_c) dT_i - v_i dp.$$

При $p = \text{const}$, $dp = 0$ – процесс
изобарический

$$dq = (c_v + R_c) dT_i.$$

Уравнение Майера

$$c_v + R_c = c_p, \quad c_p - c_v = R_c.$$

$$c_v = 818 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}), \quad c_p = 1006 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}),$$

$$c_p - c_v = 288 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}), \quad c_p/c_v = \kappa = 1,40$$

Первое начало термодинамики

$$dq = c_p dT_i - R_c T_i (dp/p).$$

Адиабатический процесс

Первое начало термодинамики для адиабатического процесса

$$p dv_i = -c_v dT_i,$$

$$c_p dT_i = R_c T_i (dp/p).$$

$$\int_{T_{i0}}^{T_i} c_p \frac{dT_i}{T_i} = \int_{p_0}^p R_c \frac{dp}{p}$$

$$\frac{T_i}{T_{i0}} = \left(\frac{p}{p_0} \right)^{R_c/c_p}, \quad \frac{T_i}{T_{i0}} = \left(\frac{p}{p_0} \right)^{(c_p - c_v) \cdot c_p}$$

$$\frac{T_i}{T_{i0}} = \left(\frac{p}{p_0} \right)^{(\kappa - 1)/\kappa},$$

где $R_c/c_p = (\kappa - 1)/\kappa = 0,286$.

Уравнение Пуассона (уравнение сухой адиабаты)

$$\frac{T_i}{T_{i0}} = \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{c_p - c_v}{c_p}}$$

Сухоадиабатический градиент

Первое начало термодинамики

$$c_p dT_i - R_c T_i \frac{dp}{p} = 0$$

Уравнение статики атмосферы

$$dp = -g\rho_e dz,$$

$$\frac{dp}{p} = -g \frac{dz}{R_c T_e}.$$

Перовое начало термодинамики
для адиабатического процесса:

$$c_p dT_i + \frac{gT_i}{T_e} dz = 0.$$

$$\left(\frac{dT_i}{dz} \right)_a = - \frac{g}{c_p} \frac{T_i}{T_e}.$$

Сухоадиабатическим градиентом называется понижение температуры при адиабатическом подъеме сухой воздушной частицы, отнесенное к единице высоты

$$\gamma_a = - (dT_i / dz)_a.$$

$$\gamma_a = \frac{g}{c_p} \frac{T_i}{T_e}.$$

В общем случае
сухоадиабатический градиент:

$$\gamma_a = g / c_p.$$

$$\gamma_a = \frac{c_p - c_v}{c_p} \frac{g}{R_c} = \frac{\kappa - 1}{\kappa} \frac{g}{R_c}.$$

$$\gamma_a = 0,0098 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{м} = 0,98 \text{ } ^\circ\text{C}/100 \text{ м}.$$

Значения γ_a для некоторых планет Солнечной системы:

Планета	Меркурий	Венера	Земля	Марс	Юпитер	Солнце
γ_a °C/км	3—4,5	8,5—11	9,8	4,5	2,5	13,4

Если считать сухоадиабатический
градиент постоянной величиной:

$$-dT_i/dz = \gamma_a$$

$$T_i = T_{i0} - \gamma_a(z - z_0) \approx T_{i0} - 0,01(z - z_0)$$

- ***Политропическим процессом*** называется такой процесс, при котором приток тепла к воздушной частице прямо пропорционален изменению температуры:

$$dq = c dT$$

частными случаями политропического процесса являются:

- адиабатический процесс ($c = 0, dq = 0$);
- изобарический процесс ($c = c_p, dq = c_p dT$);
- изостерический процесс ($c = c_v, dq = c_v dT$);
- изотермический процесс ($c = \pm \infty, dT = 0$).

Потенциальная температура

- Температура, которую примет воздушная частица, если ее опустить или поднять сухоадиабатически с исходного уровня до уровня, где давление равно 1000 гПа, носит название *потенциальной температуры* (Θ).

Рассмотрим два состояния воздушной частицы:
начальное (T_i, p) и конечное ($\Theta, 1000 \text{ гПа}$).

$$\frac{T_i}{\Theta} = \left(\frac{p}{1000} \right)^{(\kappa - 1)/\kappa}, \quad \text{или} \quad \Theta = T_i \left(\frac{1000}{p} \right)^{(\kappa - 1)/\kappa}$$

При давлении на поверхности Земли

$$p_0 = 1000 \text{ гПа}$$

$$\Theta = T_i + z/100.$$

Если $p_0 \neq 1000$ гПа

$$\Theta = T_i + \frac{z}{100} + \frac{1000 - p_0}{12,5}.$$

- Вблизи уровня моря $h \approx 8$ м/гПа, поэтому при дополнительном опускании от поверхности Земли до уровня 1000 гПа частица нагревается:

$$\frac{(1000 - p_0) \cdot 8}{100} = \frac{1000 - p_0}{12,5}.$$

- При сухоадиабатических перемещениях одной и той же воздушной частицы потенциальная температура сохраняет постоянное значение

$$\frac{d\Theta}{\Theta} = \frac{dT_i}{T_i} - \frac{R_c}{c_p} \frac{dp}{p}$$

При адиабатическом движении
воздушной частицы

$$d\Theta/\Theta = 0, \quad d\Theta = 0, \quad \Theta = \text{const.}$$

приток тепла к воздушной частице
связан с изменением ее
потенциальной температуры:

$$dq = c_p T_i \frac{d\Theta}{\Theta}$$

$$c_p T_i \frac{d\Theta}{\Theta} = c_p dT_i + \frac{g T_i}{T_e} dz,$$

$$c_p T_i \frac{d\Theta}{\Theta} = c_p dT_i + g dz - \frac{g (T_e - T_i)}{T_e} dz.$$

Введем следующие
обозначения:

$$c_p dT_i = d\mathcal{E}_i, \quad g dz = d\Phi^*, \quad \frac{g(T_i - T_e)}{T_e} dz = dE_i.$$

где $\Pi_i = \mathcal{E}_i + \Phi^* + E_i$ — полная энергия частицы единичной массы.

- При адиабатическом перемещении воздушной частицы ее полная энергия не изменяется:

$$\mathcal{E}_i + \Phi^* + E_i = \text{const}$$

*Адиабатические процессы во
влажном ненасыщенном воздухе*

Количество теплоты:

- работа расширения $dw = p dv_i$
- изменение внутренней энергии сухой частицы воздуха $du_c = (1 - s)c_{vc} dT_i$
- изменение внутренней энергии водяного пара $du_{\Pi} = s \cdot c_{v\Pi} dT_i$,

где s — доля водяного пара, c_{vc} и $c_{v\Pi}$ — удельные теплоемкости сухого воздуха и водяного пара при постоянном объеме

Первое начало термодинамики

$$dq = du_c + du_{\Pi} + dw.$$

$$dq = [(1 - s)c_{vc} + sc_{v\Pi}]dT_i + pdv_i$$

уравнение состояния влажного
воздуха

$$p_i v_i = [R_c(1 - s) + R_{\text{H}_2\text{O}}s]T_i,$$

Первое начало термодинамики

$$dq = [(1 - s)c_{pc} + sc_{pн}] dT_i - \frac{RT_i}{p} dp,$$

где c_{pc} и $c_{pн}$ — удельные теплоемкости сухого воздуха и водяного пара при постоянном давлении;

$R = R_c(1 - s) + R_{п}s$ - удельная газовая постоянная влажного воздуха.

При адиабатическом подъеме ($dq = 0$) влажного ненасыщенного воздуха изменение температуры, отнесенное к единице высоты:

$$-\frac{dT_i}{dz} = \frac{g}{(1-s)c_{pc} + sc_{pп}} \frac{R}{R_e} \frac{T_i}{T_e}$$

- В реальных условиях $R \approx R_e \approx R_c$

$$-\frac{dT_i}{dz} = \frac{g}{c_{pc}} \frac{T_i}{T_e} = \gamma_a \approx 1 \text{ } ^\circ\text{C}/100 \text{ м.}$$

Вывод:

- температура влажной ненасыщенной частицы изменяется при адиабатическом подъеме практически так же, как и температура сухой частицы;
- кривой состояния для влажного ненасыщенного воздуха служит сухая адиабата.

Влажноадиабатические процессы

- Влажноадиабатическим называется адиабатический процесс, протекающий во влажном насыщенном воздухе.

Кривая состояния насыщенной частицы при ее адиабатическом подъеме называется *влажной адиабатой*.

Изменение температуры частицы при подъеме на единицу высоты при влажноадиабатическом процессе называется *влажноадиабатическим градиентом* γ'_a .

При влажноадиабатическом процессе:

- а) температура поднимающейся частицы уменьшается с высотой, но медленнее, чем при сухоадиабатическом процессе ($\gamma'_a < \gamma_a$);
- б) доля пара s_m вследствие конденсации уменьшается с высотой;
- в) относительная влажность поднимающегося воздуха постоянна ($f = 100 \% = \text{const}$).

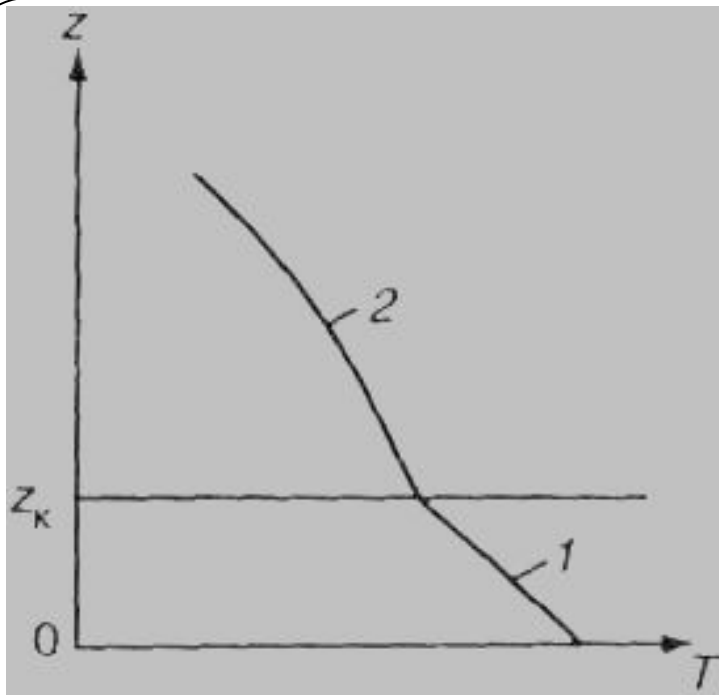


Рис. 4.3. Кривая состояния влажного воздуха.

1 — сухая адиабата, 2 — влажная адиабата.

- Адиабатический подъем влажного воздуха до достижения состояния насыщения (до уровня конденсации) называется *сухой стадией*, а в состоянии насыщения (выше уровня конденсации) — *влажной стадией* (рис.).

Термодинамические графики

- Термодинамическими графиками называются адиабатные диаграммы, специально приспособленные для анализа данных аэрологического зондирования атмосферы и определения условий атмосферной стратификации.

Виды термодинамических графиков:

- Эмаграмма Рефсдаля ($x=T$, $y=-R\ln P$);
- Тефиграмма Шоу ($x=T$, $y=\varphi$);
- Аэрограмма Рефсдаля ($x=\ln T$, $y=-R\ln P$);
- Россбиграмма ($x=s$, $y=\Theta$);
- Штювеграмма ($x=T$, $y=P^{(AR/C_p)}$);
- Зондограмма Лайхтмана ($x=\ln T$, $y=T\cdot\varphi$);

T – температура, P – давление, φ – энтропия, s – отношение смеси, близкое по величине к удельной влажности (массовой доли водяного пара), Θ – потенциальная энергия, R – удельная газовая постоянная, C_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении, A – термический эквивалент работы.

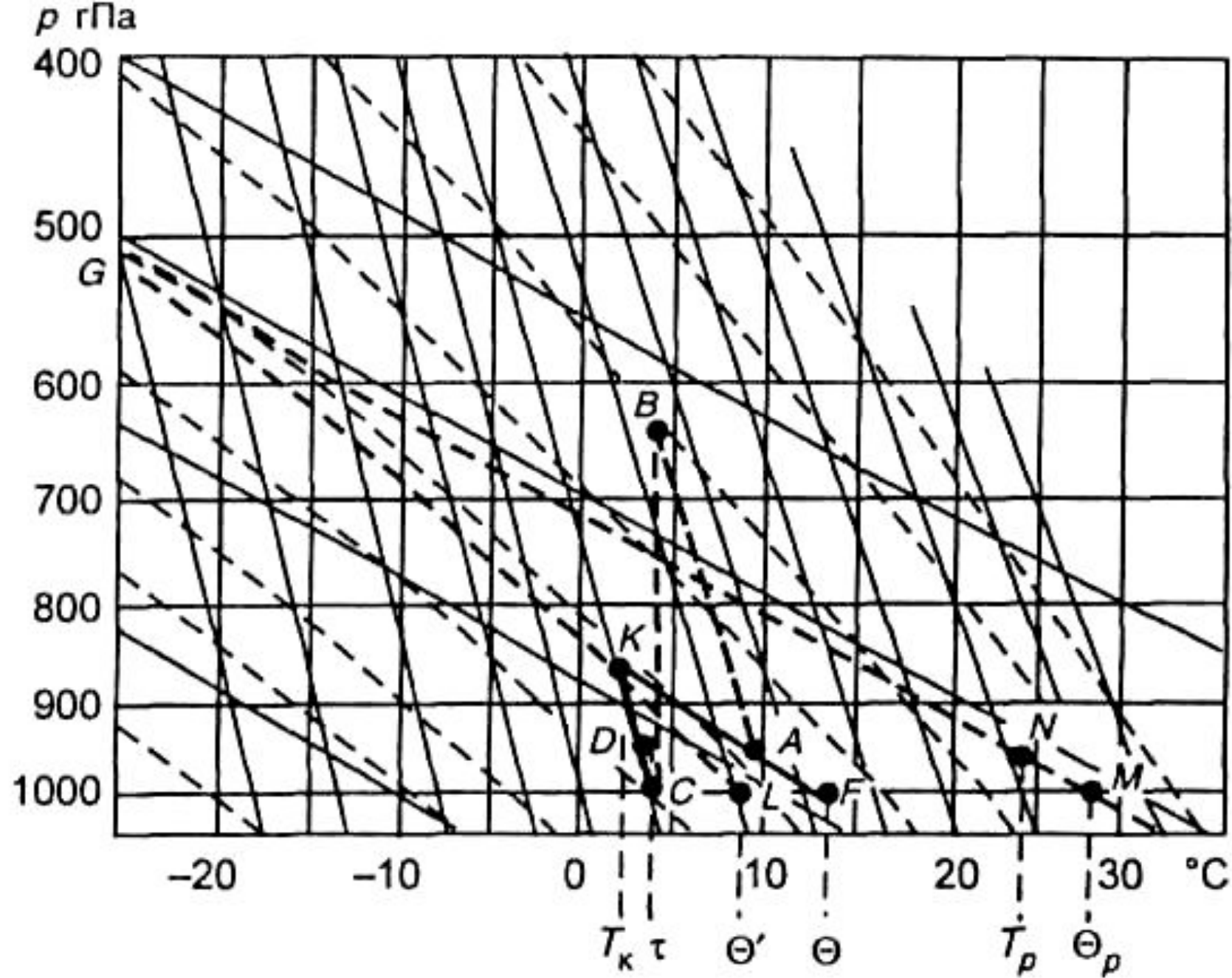


Рис. 4.4. Схема аэрологической диаграммы (прямоугольный бланк).