

дуются на работу расширения $dw = p dv_i$, изменение внутренней энергии сухой частицы воздуха $du_c = (1 - s) c_{vc} dT_i$ и водяного пара $du_{\text{п}} = s c_{\text{вп}} dT_i$ (s — доля водяного пара, c_{vc} и $c_{\text{вп}}$ — удельные теплоемкости сухого воздуха и водяного пара при постоянном объеме).

По первому началу термодинамики

$$dq = du_c + du_{\text{п}} + dw \text{ или } dq = [(1 - s) c_{vc} + s c_{\text{вп}}] dT_i + p dv_i. \quad (7.1)$$

Если воспользоваться уравнением состояния влажного воздуха

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

то уравнение (7.1) можно привести к виду

$$dq = [(1 - s) c_{pc} + s c_{\text{пп}}] dT_i - \frac{RT_i}{p} dp, \quad (7.2)$$

где c_{pc} и $c_{\text{пп}}$ — удельные теплоемкости сухого воздуха и водяного пара при постоянном давлении; $R = R_c (1 - s) + R_{\text{п}} s$ — удельная газовая постоянная влажного воздуха.

При адиабатическом подъеме ($dq = 0$) влажного ненасыщенного воздуха изменение температуры, отнесенное к единице высоты, по (7.2), с учетом уравнения статики равно

$$-\frac{dT_i}{dz} = \frac{g}{(1 - s) c_{pc} + s c_{\text{пп}}} \frac{R}{R_e} \frac{T_i}{T_e}. \quad (7.3)$$

Здесь R_e — удельная газовая постоянная окружающего частицу воздуха.

Доля пара s в реальных условиях не больше 0,03—0,04, это значит, что R и R_e близки к удельной газовой постоянной сухого воздуха $R \approx R_e \approx R_c$, а $(1 - s) c_{pc} + s c_{\text{пп}} \approx c_{pc}$. С учетом этого формула (7.3) принимает вид

$$-\frac{dT_i}{dz} = \frac{g}{c_{pc}} \frac{T_i}{T_e} = \gamma_a \approx 1 \text{ } ^\circ\text{C}/100 \text{ м}. \quad (7.4)$$

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

8 Влажноадиабатические процессы

Влажноадиабатическим называется адиабатический процесс, протекающий во влажном *насыщенном* воздухе. При таком процессе происходит конденсация водяного пара или испарение капель воды.

Термодинамические процессы во влажном насыщенном воздухе существенно отличаются от процессов в сухом и влажном ненасыщенном воздухе не только с количественной, но и с качественной стороны. Чтобы убедиться в этом, рассмотрим процесс адиабатического подъема влажного воздуха. До тех пор пока влажный воздух не насыщен, его состояние меняется по сухоадиабатическому закону. Температура частицы при подъеме уменьшается (практически на 1°C на 100 м), доля пара сохраняется постоянной ($s = \text{const}$), поскольку не происходит конденсация водяного пара. Относительная же влажность адиабатически поднимающейся частицы растет с увеличением высоты (это утверждение доказывается в п. I главы 17). Таким образом, при адиабатическом подъеме влажной ненасыщенной частицы наступает такой момент, когда частица достигает состояния насыщения ($f = 100\%$). Уровень, на котором влажный ненасыщенный воздух достигает состояния насыщения, называется *уровнем конденсации* и обозначается z_k ; температура и давление на этом уровне обозначаются соответственно T_k и p_k .

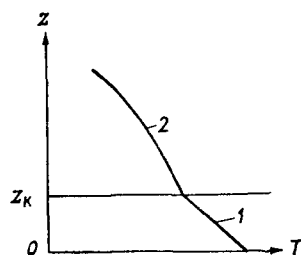


Рис. 4.3. Кривая состояния влажного воздуха.

1 — сухая адиабата, 2 — влажная адиабата.

Если влажная насыщенная частица поднимается и выше уровня конденсации, то вследствие дальнейшего понижения температуры начнется конденсация водяного пара. При конденсации выделяется скрытая теплота парообразования (около 2500 кДж при конденсации 1 кг водяного пара), в результате чего температура частицы выше уровня конденсации понижается медленнее: часть работы расширения совершается за счет теплоты конденсации (в то время как до достижения состояния насыщения работа расширения совершалась только за счет уменьшения внутренней энергии).

Кривая состояния насыщенной частицы при ее адиабатическом подъеме называется *влажной адиабатой*, а изменение температуры частицы при подъеме на единицу высоты при влажноадиабатическом процессе — *влажноадиабатическим градиентом* γ'_a .

Из предыдущего следует, что 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 ($f = 100\% = \text{const}$).

Адиабатический подъем влажного воздуха до достижения состояния насыщения (до уровня конденсации) называется *сухой стадией*, а в состоянии насыщения (выше уровня конденсации) — *влажной стадией* (рис. 4.3).