

УДК 536.7 (07)

DOI: 10.22213/2413-1172-2022-2-64-71

Методики построения и свойства унифицированных и индивидуальных по давлению диаграмм «энтальпия – влагосодержание» сжатого воздуха

В. Н. Диденко, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Д. А. Хворенков, кандидат технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

И. И. Фахразиев, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

В инженерной практике при определении характеристик атмосферного воздуха широко используются I-d-диаграммы Рамзина, разработанные для некоторого среднего барометрического давления. Прямой перенос (без пересчета) характеристик с атмосферных I-d-диаграмм на сжатый воздух ведет к серьезным ошибкам. К сжатому воздуху применимы лишь индивидуальные и унифицированные по давлению I-d-диаграммы.

Цель исследования – создание рабочих (до уровня алгоритмов) методик построения таких I-d-диаграмм и установление границ их применимости к воздуху в другом состоянии и при другом давлении. Для построения I-d-диаграмм сжатого воздуха используется поле атмосферной I-d-диаграммы. Влажный воздух полагается идеальным газом, энтальпия которого не зависит от давления. С атмосферной I-d-диаграммы копируются изотермы и изоэнтальпы с сохранением их масштаба. Также копируется график парциального давления водяного пара, но его масштаб изменяется пропорционально отношению давления сжатого воздуха к принятому барометрическому.

В статье приведен алгоритм построения индивидуальных по давлению I-d-диаграмм с сеткой кривых постоянной относительной влажности и методика определения в заданной точке такой I-d-диаграммы относительной влажности воздуха для другого давления. Эта методика позволяет изображать на атмосферной I-d-диаграмме кривые относительной влажности сжатого воздуха.

Для практических задач с конденсацией водяного пара сжатого воздуха удобно использовать унифицированные по давлению I-d-диаграммы, отличающиеся наличием сетки кривых относительной влажности насыщенного воздуха для ряда значений давления. Поэтому в статье также приводится алгоритм построения унифицированных I-d-диаграмм и дается методика определения относительной влажности ненасыщенного воздуха при давлении P в заданной точке такой диаграммы. Представлены примеры применения данной методики.

Ключевые слова: энтальпия, влагосодержание, воздух, давление, точка росы, температура.

Принятые обозначения: I – энтальпия влажного воздуха; d – влагосодержание воздуха; B – атмосферное (барометрическое) давление; $\varphi_{P_1}, \varphi_{P_2}$ – относительная влажность воздуха при давлении P_1, P_2 ; t – температура воздуха, °C; $(P_n)_B$ и $(P_n)_P$ – парциальное давление водяного пара в воздухе, соответственно, при давлении B и P ; $(P_{n.n})_{t_i}$ – давление насыщения водяного пара при температуре t_i ; $P_{\varphi=100\%}$ – давление для кривой $\varphi = 100\%$, проходящей через рассматриваемую точку на унифицированной I-d-диаграмме.

Введение

Диаграмма «энтальпия – влагосодержание» воздуха (I-d-диаграмма) при среднем барометрическом давлении $B \cong 98$ кПа разработана Л. К. Рамзиным в 1918 г. [1] и предназначена для быстрого графического определения параметров влажного воздуха по двум известным параметрам. Методика ее построения и использования подробно изложена в большом количе-

стве работ в связи с огромной практической значимостью диаграммы процессов [2–9]. В ряде практических случаев востребован метод быстрого графического определения параметров влажного воздуха при давлении, отличном от барометрического. Подобные диаграммы нужны, например, для определения параметров воздуха в регенераторах адсорбента, адсорберах осушителей воздуха, компрессорах и др. [10–16].

В соответствии с изложенным цели исследования сформулированы следующим образом: создание рабочих до уровня алгоритмов методик построения $I-d$ -диаграмм сжатого воздуха и установление границ их применимости к сжатому воздуху в другом состоянии и при другом давлении [17–20].

Индивидуальные по давлению $I-d$ -диаграммы сжатого воздуха, учитывая их множество, должны строиться под конкретные изобарные процессы. Для ряда практических задач, например, определения массы конденсата при охлаждении сжатого воздуха, удобно использовать $I-d$ -диаграмму с сеткой кривых $\varphi_p = 100\%$, построенных для различного давления воздуха. В данной работе такая диаграмма для краткости и отражения сути называется унифицированной по давлению $I-d$ -диаграммой сжатого воздуха. («Унификация – приведение к единообразной системе или форме. В технике – управление многообразием».)

В 1961 г. была опубликована работа Зубарева В. Н. и Маркина В. А., в которой была представлена диаграмма с построенными в $I-d$ -координатах линиями $\varphi_p = 100\%$ для различных давлений воздуха. Рабочая методика построения такой диаграммы в доступных современных источниках не обнаружена, и упоминания об этой диаграмме найдены авторами данного исследования лишь в работах В. И. Прохорова (1973 г.) и Т. Н. Андриановой, Б. В. Дзампова, В. Н. Зубарева, С. А. Ремизова (1981 г.).

Построение индивидуальных по давлению $I-d$ -диаграмм сжатого воздуха

Для построения индивидуальных по давлению диаграмм используется поле какой-либо существующей атмосферной $I-d$ -диаграммы для давления B . На индивидуальной по давлению и атмосферной $I-d$ -диаграммах изобары изображаются одинаковым образом, поскольку энтальпия влажного воздуха, полагаемого идеальным газом, не зависит от давления, $\frac{kJ}{kg_{сух.в}}$:

$$I \cong 1,0048t + d(2500 + 1,96t). \quad (1)$$

С учетом этого с атмосферной $I-d$ -диаграммы можно копировать оси I и d , все изотермы и изобары с сохранением их масштаба. Также без изменения копируется график зависимости парциального давления пара $(P_n)_B$ от d . Поскольку при повышении давления атмосферного воздуха в N раз ($N = P/B$) парциальное давление водяного пара в нем также увели-

чивается в N раз – от $(P_n)_B$ до $(P_n)_P$, то для каждого индивидуального давления воздуха P должен быть свой график $(P_n)_P = (P_n)_P(d)$. Для унификации этого множества в качестве универсального используется скопированный график $(P_n)_P = (P_n)_P(d)$, но ось $(P_n)_B$ заменяется на $(P_n)_P/N$ при сохранении прежнего масштаба. В этом случае для нахождения $(P_n)_P$ достаточно величину парциального давления, снятую с оси универсального графика, умножить на N .

Алгоритм построения сетки кривых $\varphi_p = 100\%$ на индивидуальной по давлению $I-d$ -диаграмме сжатого воздуха

1. Задается давление влажного воздуха P .
2. Задается минимальное из рассматриваемых значение относительной влажности сжатого воздуха $\varphi_{P_{min}}$.
3. Задается M_{φ_p} – общее число кривых φ_p на $I-d$ -диаграмме воздуха с давлением P .
4. Задается ряд значений температуры воздуха $t_i, ^\circ C$ ($i = 1, 2, 3, \dots$), включающий все изотермы на атмосферной $I-d$ -диаграмме.
5. Для каждой температуры t_i по таблицам насыщенного водяного пара (НВП) определяются соответствующие значения давления насыщения водяного пара $(P_{н.п})_{t_i}$.
6. В диапазоне от $\varphi_{P_{min}}$ до 1,0 выбирается последовательно очередное значение φ_{P_j} воздуха с давлением P . Здесь $j = 1, 2, \dots, M_{\varphi_p}$.

В случае равномерной сетки $\varphi_{P_j} = \varphi_{P_{min}} + (j-1) \frac{(1,0 - \varphi_{P_{min}})}{(M_{\varphi_p} - 1)}$.

7. Для текущих значений φ_{P_j} и всего ряда температур t_i определяется соответствующий ряд значений $(d)_{\varphi_{P_j} t_i}$, $\frac{kg}{kg_{сух}}$:

$$(d)_{\varphi_{P_j} t_i} = 0,622 \frac{\varphi_{P_j} (P_{н.п})_{t_i}}{P - \varphi_{P_j} (P_{н.п})_{t_i}}. \quad (2)$$

8. Точки пересечения прямых $(d)_{\varphi_{P_j} t_i} = const$ с соответствующими изотермами t_i на $I-d$ -диаграмме соединяются плавной кривой $\varphi_{P_j} = const$. После пересечения с изотермой насыщения влаги $(t_{нас})_P$ при давлении P плав-

ность кривых $\varphi_{P_1} = \text{const}$ нарушается, и они идут почти вертикально вверх подобно кривым $\varphi_B = \text{const}$ на атмосферных $I-d$ -диаграммах ВТИ.

9. Далее, начиная с п. 6, все этапы повторяется для следующего значения φ_{P_1} .

Определение в заданной точке индивидуальной по давлению $I-d$ -диаграммы величины относительной влажности сжатого воздуха при другом давлении

Пусть требуется для воздуха с давлением P_2 найти величину φ_{P_2} в заданной точке индивидуальной $I-d$ -диаграммы, построенной для давления P_1 и содержащей сетку кривых $\varphi_{P_1} = \text{const}$. Поскольку в заданной точке $I-d$ -диаграммы значения t и d на кривых $\varphi_{P_1} = \text{const}$ и $\varphi_{P_2} = \text{const}$ совпадают, то выполняется соотношение

$$0,622 \frac{\varphi_{P_1}(P_{\text{п.н}})_t}{P_1 - \varphi_{P_1}(P_{\text{п.н}})_t} = 0,622 \frac{\varphi_{P_2}(P_{\text{п.н}})_t}{P_2 - \varphi_{P_2}(P_{\text{п.н}})_t}; \quad (3)$$

$$\varphi_{P_2} = \varphi_{P_1} \frac{P_2}{P_1}. \quad (4)$$

Здесь $\varphi_{P_1} \leq (P_1 / P_2)$, так как φ_{P_2} не может быть больше единицы. Поскольку параметр d в структуре этой формулы отсутствует, то (4) выполняется при всех значениях d , и кривая $\varphi_{P_2} = \text{const}$ для давления P_2 совпадает с кривой $\varphi_{P_1} = \text{const}$ для давления P_1 .

Полученное соотношение (4) позволяет изображать некоторые кривые относительной влажности сжатого ненасыщенного воздуха на атмосферной $I-d$ -диаграмме. При $P_1 = B$ из (4) получается формула соответствия кривых $\varphi_B = \text{const}$ атмосферной $I-d$ -диаграммы определенным кривым $\varphi_{P_2} = \text{const}$ для воздуха с давлением P_2 :

$$\varphi_{P_2} = \varphi_B \frac{P_2}{B}. \quad (5)$$

Здесь $\varphi_B \leq (B / P_2)$.

Например, если на атмосферной $I-d$ -диаграмме ($B = 0,1$ МПа) минимальной из нанесенных по значению является кривая $\varphi_B = 0,05$, то равенство (5) можно использовать только для $P_2 \leq 2,0$ МПа. Результаты использования зависимости (5) для других значений φ_B представлены в таблице 1.

Таблица 1. Кривые $\varphi_{P_2} = \text{const}$ для давления P_2 , совпадающие с кривыми $\varphi_B = \text{const}$ на атмосферной $I-d$ -диаграмме ($B = 0,1$ МПа)

Table 1. Curves $\varphi_{P_2} = \text{const}$ for P_2 pressure, coinciding with the curves $\varphi_B = \text{const}$ on the atmospheric $I-d$ diagram ($B = 0.1$ MPa)

P_2 , МПа	φ_B												
	0,05	0,0667	0,10	0,125	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,0
2,0	1,0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
1,5	0,75	1,0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
1,0	0,5	0,667	1,0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,8	0,4	0,534	0,8	1,0	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,5	0,25	0,334	0,5	0,625	1,0	–	–	–	–	–	–	–	–
0,33	0,165	0,220	0,33	0,414	0,66	1,0	–	–	–	–	–	–	–
0,25	0,125	0,167	0,25	0,313	0,5	0,75	1,0	–	–	–	–	–	–
0,2	0,1	0,133	0,2	0,25	0,4	0,6	0,8	1,0	–	–	–	–	–
0,167	0,0835	0,111	0,167	0,209	0,334	0,501	0,668	0,835	1,0	–	–	–	–
0,143	0,0715	0,0954	0,143	0,179	0,286	0,429	0,572	0,715	0,858	1,0	–	–	–
0,125	0,0625	0,0834	0,125	0,156	0,25	0,375	0,5	0,625	0,75	0,875	1,0	–	–
0,111	0,055	0,0740	0,111	0,139	0,222	0,333	0,444	0,555	0,666	0,77	0,888	1,0	–
0,1	0,05	0,0667	0,10	0,125	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,0

Из таблицы 1 следует, что кривая $\varphi_B = 0,05$ на атмосферной $I-d$ -диаграмме совпадает со следующими кривыми: $\varphi_{P_2} = 1,0$ при давлении $P_2 =$

2,0 МПа; $\varphi_{P_2} = 0,75$ при давлении $P_2 = 1,5$ МПа; $\varphi_{P_2} = 0,4$ при давлении $P_2 = 0,8$ МПа и др.

Построение унифицированных I-d-диаграмм сжатого воздуха

Изоэнтальпы на унифицированных по давлению и атмосферных I-d-диаграммах изображаются одинаковым образом, поскольку воздух полагается идеальным газом, и его энтальпия не зависит от давления. При построении унифицированной I-d-диаграммы используется поле какой-либо атмосферной I-d-диаграммы с сохранением масштаба энтальпии, температуры и влагосодержания. С атмосферной I-d-диаграммы, как и при построении индивидуальных по давлению I-d-диаграмм, без изменения копируются оси I и d, все изотермы, все изоэнтальпы и кривая $\phi_B = 100\%$. Также копируется график парциального давления пара, но ось $(P_n)_B$ графика заменяется на ось $(P_n)_P/N$.

Алгоритм построения на унифицированной I-d-диаграмме сетки кривых $\phi_p = 100\%$ для различных давлений воздуха близок к алгоритму построения кривых $\phi_p = \text{const}$ на индивидуальных по давлению I-d-диаграммах.

Алгоритм построения на унифицированной I-d-диаграмме сетки кривых $\phi_p = 100\%$

1. Задается максимальное из рассматриваемых значений давление воздуха P_{\max} , МПа.
2. Задается общее число кривых $\phi_p = 100\%$ на унифицированной I-d-диаграмме, $M_{\phi_p = 100\%}$.
3. Задается ряд значений температуры воздуха t_i , °C ($i = 1, 2, 3, \dots$), включающий все изотермы на атмосферной I-d-диаграмме.
4. Для каждой температуры t_i по таблицам НВП определяются соответствующие значения давления насыщения водяного пара $(P_{\text{н.п}})_{t_i}$.
5. В диапазоне от B до P_{\max} выбирается очередное давление сжатого воздуха P_j , где $j = 1, 2, \dots, M_{\phi_p = 100\%}$. В случае равномерной сетки

$$P_j = B + (j - 1) \frac{(P_{\max} - B)}{(M_{\phi_p = 100\%} - 1)}.$$

6. Для давления воздуха P_j и всего ряда температур t_i определяется ряд значений $(d_{\max})_{\phi_p t_i}$:

$$(d_{\max})_{\phi_p t_i} = (d_n)_{t_i} = 0,622 \cdot \frac{(P_{\text{н.п}})_{t_i}}{P_j - (P_{\text{н.п}})_{t_i}}. \quad (6)$$

7. На унифицированной I-d-диаграмме точки пересечения прямых $(d_{\max})_{\phi_p t_i} = \text{const}$ с соот-

ветствующими изотермам t_i соединяются плавной кривой $\phi_{p_j} = 100\%$.

8. Далее, начиная с п. 5, все этапы повторяется уже для следующего значения давления воздуха P_j .

На рисунке 1 представлен пример унифицированной I-d-диаграммы с сеткой кривых $\phi_p = 100\%$ для ряда значений давления воздуха.

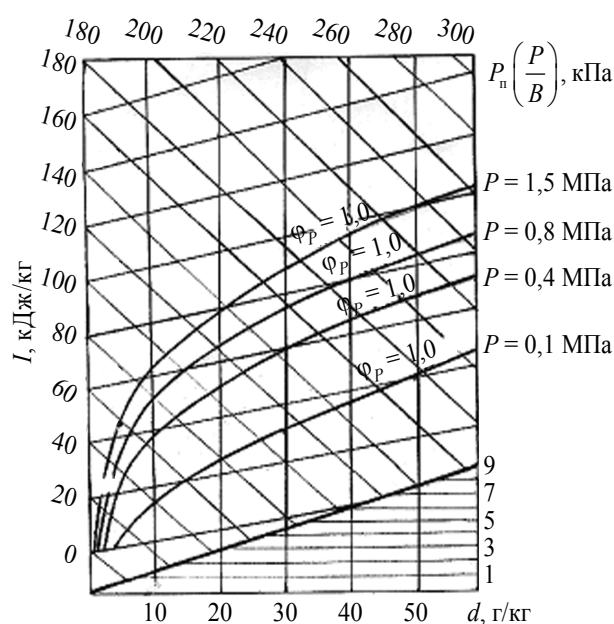


Рис. 1. Пример унифицированной I-d-диаграммы с сеткой кривых $\phi_p = 100\%$ для давлений воздуха 1,5; 0,8; 0,4 и 0,1 МПа

Fig. 1. An example of a unified I-d diagram with a grid of curves $\phi_p = 100\%$ for air pressures of 1.5; 0.8; 0.4 and 0.1 MPa

Температура точки росы воздуха с влагосодержанием d, сжатого до давления P, определяется по значению изотермы в точке пересечения прямой $d = \text{const}$ с кривой $\phi_p = 100\%$ для давления P. При сжатии в компрессоре ненасыщенного воздуха до давления P его относительная влажность понижается, поэтому точка росы этого воздуха достигается только при последующем изобарном охлаждении воздуха ($P = \text{const}$) до состояния насыщения. Дальнейший процесс изобарного ($P = \text{const}$) охлаждения насыщенного воздуха с понижением его температуры от t_1 до t_2 на унифицированной I-d-диаграмме изображается как движение по линии $\phi_p = 100\%$ от точки ее пересечения с изотермой t_1 до точки пересечения с изотер-

мой t_2 . Процесс сопровождается понижением парциального давления сухого насыщенного пара $P_{п.н} = P_{п.н}$ и уменьшением d_{\max} насыщенного воздуха на величину массы конденсата, выпавшего при охлаждении воздуха от t_1 до t_2 .

Определение в заданной точке унифицированной по давлению I-d-диаграммы величины относительной влажности ненасыщенного сжатого воздуха при другом давлении

Эта методика позволяет по унифицированной I-d-диаграмме определять текущее значение φ_P ненасыщенного воздуха в процессе его сжатия в компрессоре. Поскольку в заданной точке унифицированной I-d-диаграммы значения t_i и d на кривых φ_P (при давлении P) и $\varphi = 100\%$ (при давлении $P_{\varphi_P=100\%}$) совпадают, то выполняется соотношение

$$\begin{aligned} 0,622 \cdot \frac{\varphi_P (P_{п.н})_t}{P - \varphi_P (P_{п.н})_t} &= \\ = 0,622 \cdot \frac{1,0 \cdot (P_{п.н})_t}{P_{\varphi_P=100\%} - 1,0 \cdot (P_{п.н})_t} \end{aligned} \quad (7)$$

Из (7) после элементарных преобразований получается формула для определения φ_P воздуха при давлении P в рассматриваемой точке унифицированной I-d-диаграммы

$$\varphi_P = \frac{P}{P_{\varphi_P=100\%}}, \quad (8)$$

где $P < P_{\varphi_P=100\%}$.

Отсутствие d и t в формуле (8) означает, что кривые $\varphi_P = \text{const}$ (для $P < P_{\varphi_P=100\%}$) и $\varphi_P = 100\%$ (для $P_{\varphi_P=100\%}$), проходящие через рассматриваемую точку на унифицированной I-d-диаграмме, полностью совпадают во всем диапазоне значений d . Это совпадение кривых позволяет определять φ_P по значениям $P_{\varphi_P=100\%}$ для кривых $\varphi_P = 100\%$, проходящих через ту же заданную точку на унифицированной I-d-диаграмме.

На рисунке 2 приведены примеры таких совпадений. Например, кривая $\varphi_P = 100\%$ для $P_{\varphi_P=100\%} = 1,5$ МПа на унифицированной I-d-диаграмме (рис. 1) совпадает с рядом кривых

$\varphi_P = 100\%$ для других давлений воздуха: $\varphi_P = 0,933$ для $P = 1,4$ МПа; $\varphi_P = 0,8$ для $P = 1,2$ МПа; $\varphi_P = 0,4$ для $P = 0,6$ МПа; $\varphi_P = 0,2$ для $P = 0,3$ МПа и др.

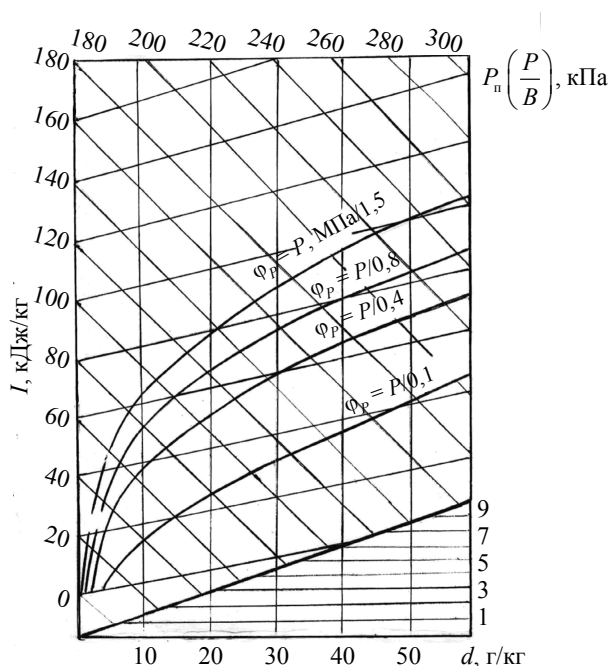


Рис. 2. Примеры совпадения на унифицированной I-d-диаграмме (рис. 1) кривых относительной влажности насыщенного воздуха с давлением $P_{\varphi_P=100\%} = 1,5; 0,8; 0,4; 0,1$ МПа с кривыми $\varphi_P = \text{const}$ ненасыщенного воздуха с давлением $P < P_{\varphi_P=100\%}$

Fig. 2. Examples of coincidence on the unified I-d diagram (fig. 1) of curves of relative humidity of saturated air with pressure $P_{\varphi_P=100\%} = 1.5; 0.8; 0.4; 0.1$ MPa with curves $\varphi_P = \text{const}$ unsaturated air pressure $P < P_{\varphi_P=100\%}$

С другой стороны, при совпадении масштаба и основной разметки унифицированной и атмосферной I-d-диаграмм все кривые $\varphi_B = \text{const}$ на атмосферной I-d-диаграмме можно рассматривать как кривые $\varphi_P = 100\%$ для некоторого давления воздуха $P = P_{\varphi_P=100\%} \geq B$. Так, кривая $\varphi_B = 0,125$ на атмосферной I-d-диаграмме ($B = 0,1$ МПа) по (8) может рассматриваться как кривая $\varphi_P = 100\%$ для давления воздуха $P = P_{\varphi_P=100\%} = 0,8$ МПа. Этот и другие примеры соответствия, приведенные в таблице 2, могут быть полезны при изображении на атмосферных I-d-диаграммах линий относительной влажности сжатого насыщенного воздуха.

Таблица 2. Давление воздуха для кривых $\varphi_p = 100\%$, совпадающих с кривыми $\varphi_B = \text{const}$ на атмосферной $I-d$ -диаграмме ($B = 0,1 \text{ МПа}$)

Table 2. Air pressure for curves $\varphi_p = 100\%$, coinciding with curves $\varphi_B = \text{const}$ on the atmospheric $I-d$ -diagram ($B = 0.1 \text{ MPa}$)

φ_B	0,05	0,067	0,1	0,125	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$P_{\varphi=100\%}$, МПа	2,0	1,5	1,0	0,8	0,5	0,333	0,25	0,2	0,167	0,143	0,125	0,111	0,1

Выводы

К сжатому воздуху применимы два типа $I-d$ -диаграмм – индивидуальные по давлению P и унифицированные.

1. Созданы рабочие методики построения индивидуальных по давлению и унифицированных $I-d$ -диаграмм сжатого влажного воздуха. Методики доведены до уровня подробных алгоритмов. Приводится алгоритм построения индивидуальных по давлению $I-d$ -диаграммы с сеткой кривых $\varphi_p = \text{const}$ и дается методика определения φ_{p_2} для давления $P_2 \neq P$ в заданной точке такой диаграммы. Также приводится алгоритм построения унифицированной $I-d$ -диаграммы с сеткой кривых $\varphi_p = 100\%$ и дается методика определения φ_p воздуха с другим давлением в заданной точке такой диаграммы.

2. Принципиальным и обоснованным положением исследования является использование поля существующих атмосферных $I-d$ -диаграмм с сохранением масштаба копируемых изотерм и изоэнтальп. На копируемых графиках парциального давления водяного пара масштаб давления увеличивается кратно превышению давления сжатого воздуха над атмосферным.

Данное положение наделяет построенные $I-d$ -диаграммы свойством ограниченной универсальности, то есть возможностью изображения на них других состояний влажного воздуха, но при ограниченном наборе давлений. Так, на $I-d$ -диаграмме, построенной для какого-то индивидуального давления, можно изображать некоторые кривые относительной влажности для других давлений воздуха. Или на унифицированной $I-d$ -диаграмме, содержащей сетку кривых относительной влажности насыщенного воздуха при различном давлении, изображать кривые относительной влажности ненасыщенного воздуха при ряде других значений давления.

Библиографические ссылки

1. Столетие $I-d$ -диаграммы влажного воздуха: устройство, применение, модернизация / А. Г. Аверкин, А. И. Ерёмкин, Е. Г. Ежов, Ю. А. Аверкин // Региональная архитектура и строительство. 2017. № 4 (33). С. 166–172.

2. Аверкин А. Г., Ерёмкин А. И., Аверкин Ю. А. К вопросу расширения области применения $I-d$ -диаграммы влажного воздуха при создании микроклимата помещений // Sciences of Europe. 2018. № 24-2 (24). С. 40–45.

3. Воронова О. С., Конопацкий Е. В. Геометрическое моделирование параметров физического состояния воды и водяного пара // Вестник кибернетики. 2019. № 1 (33). С. 29–38.

4. Olkhovskiy D.V., Zaitsev A.V., Semin M.A. Variation of cooling efficiency of air conditioning systems in working spaces of deep mines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2021, no. 12, pp. 110-119. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_12_0_110.

5. Erdogan M., Bau U., Bardow A. Benchmarking commercial adsorbents for drying air in a packed bed. *Applied Thermal Engineering*, 2019, vol. 160, no. 113942. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.113942.

6. Lowrey S., Sun Z. Experimental investigation and numerical modelling of a compact wet air-to-air plate heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 2018, vol. 131, pp. 89-101. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2017.11.127.

7. Giampieri A., Ma Z., Ling-Chin J., Bao H., Smallbone A. J., Roskilly A. P. Liquid desiccant dehumidification and regeneration process: Advancing correlations for moisture and enthalpy effectiveness. *Applied Energy*, 2022, vol. 314, no. 118962. DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.118962.

8. Huang-Xi Fu, Xiao-Hua Liu. Review of the impact of liquid desiccant dehumidification on indoor air quality. *Building and Environment*, 2017, vol. 116, pp. 158-172. DOI:10.1016/j.buildenv.2017.02.014.

9. Bamimore O.T., Enibe S.O., Adedeji Paul. A. Parametric Effects On The Performance Of An Industrial Cooling Tower. *Journal of Thermal Engineering*, 2021, vol. 7, no. 4, pp. 905-917. DOI: 10.18186/thermal.930791.

10. Руполь-Сарагоси Т. Л., Руполь-Сарагоси Л. Ф. Повышение энергоэффективности процесса адсорбционной осушки сжатого воздуха // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2019. № 3 (75). С. 135–142.

11. Обзор методов очистки и осушки сжатого воздуха / А. А. Подчуфаров, А. А. Жердев, А. Н. Спирина, Д. А. Лавринов, Е. М. Быченко // Холдильная техника. 2020. № 4. С. 26–31.

12. Демин Ю. К., Картацев С. В. Энерго- и ресурсосбережение при осушке сжатого воздуха в компрессорной установке // Энергосбережение и водоподготовка. 2017. № 1 (105). С. 8–12.

13. Курзина И. А., Мецьяков Е. П. Разработка энергосберегающих технологий осушения сжатого

воздуха в процессе компримирования и подготовки для использования в промышленности и на транспорте // Вестник Томского государственного университета. Химия. 2017. № 9. С. 80–82. DOI: 10.17223/24135542/9/8.

14. Козлов В. В., Крылов П. В., Пискун Е. С. Анализ перспективных технологических схем подготовки воздуха в системах термостатирования стартовых комплексов // Инженерный журнал: наука и инновации. 2021. № 9 (117). DOI: 10.18698/2308-6033-2021-9-2111.

15. Балалаев А. Н., Фащевский Н. Н. Совершенствование процесса осушения сжатого воздуха при техническом обслуживании пассажирских вагонов на ПТО // Вестник Донецкой академии автомобильного транспорта. 2019. № 2. С. 55–64.

16. Kozlov V.V., Shadrin V.S., Podchufarov A.A. Express analysis of technological processes of compression and drying of wet air at the stages of design and operation of compressor stations. AIP Conference Proc., 2019, vol. 2141, pp. 1-11. DOI: 10.1063/1.5122079.

17. Dai J., fa Diao Y. Numerical analysis of transient coupled heat and moisture transfer in textile drying with porous relative impact jet. *Applied Thermal Engineering*, 2022, vol. 212, no. 118613. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118613.

18. Kashif Shahzad M., Ding Y., Li Q., Xuan Y., Gao N., Chen G. Novel multifunctional open absorption heat pump system with compressed air dryer assisted preliminary flash regeneration-an industrial application. *Applied Thermal Engineering*, 2022, vol. 211, no. 118526. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118526.

19. Srivatsa A., Perry Y. Li. How moisture content affects the performance of a liquid piston air compressor/expander. *Journal of Energy Storage*, 2018, vol. 18, pp. 121-132. DOI: 10.1016/j.est.2018.04.017.

20. Zhan C., Yin Y., Guo X., Jin X., Zhang X. Investigation on drying performance and alternative analysis of different liquid desiccants in compressed air drying system. *Energy*, 2018, vol. 165, pp. 1-9. DOI: 10.1016/j.energy.2018.09.164.

References

1. Averkin A.G., Eremkin A.I., Ezhov E.G., Averkin Yu.A. [Century I-d-diagrams of humid air: device, application, modernization]. *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo*, 2017, no. 4, pp. 166-172 (in Russ.).

2. Averkin A.G., Eremkin A.I., Averkin Yu.A. [On the issue of expanding the scope of the I-d-diagram of moist air when creating the microclimate of the premises]. *Sciences of Europe*, 2018, no. 24-2, pp. 40-45 (in Russ.).

3. Voronova O.S., Konopatskii E.V. [Geometric modeling of the parameters of the physical state of water and steam]. *Vestnik kibernetiki*, 2019, no. 1, pp. 29-38 (in Russ.).

4. Olkhovskiy D. V., Zaitsev A. V., Semin M. A. Variation of cooling efficiency of air conditioning systems in working spaces of deep mines. *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2021, vol. 2021, no. 12, pp. 110-119. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_12_0_110.

5. Erdogan M., Bau U., Bardow A. Benchmarking commercial adsorbents for drying air in a packed bed. *Applied Thermal Engineering*, 2019, vol. 160, no. 113942. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.113942.

6. Lowrey S., Sun Z. Experimental investigation and numerical modelling of a compact wet air-to-air plate heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 2018, vol. 131, pp. 89-101. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.11.127.

7. Giampieri A., Ma Z., Ling-Chin J., Bao H., Smallbone A. J., Roskilly A.P. Liquid desiccant dehumidification and regeneration process: Advancing correlations for moisture and enthalpy effectiveness. *Applied Energy*, 2022, vol. 314, no. 118962. DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.118962.

8. Huang-Xi Fu, Xiao-Hua Liu Review of the impact of liquid desiccant dehumidification on indoor air quality. *Building and Environment*, 2017, vol. 116, pp.158–172. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.02.014.

9. Bamimore O.T., Enibe S.O., Adedeji Paul. A. Parametric Effects On The Performance Of An Industrial Cooling Tower. *Journal of Thermal Engineering*, 2021, vol. 7, no. 4, pp. 905-917. DOI: 10.18186/thermal.930791.

10. Ripol'-Saragosi T. L., Ripol'-Saragosi L. F. [Improving the energy efficiency of the process of adsorption drying of compressed air]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya*, 2019, no. 3, pp. 135-142 (in Russ.).

11. Podchufarov A.A., Zherdev A.A., Spirina A.N., Lavrinov D.A., Bytsenko E.M. [Review of methods for cleaning and drying compressed air]. *Kholodil'naya tekhnika*, 2020, no. 4, pp. 26-31 (in Russ.).

12. Demin Yu.K., Kartavtsev S.V. [Energy and resource saving when drying compressed air in a compressor unit]. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*, 2017, no. 1, pp. 8-12 (in Russ.).

13. Kurzina I.A., Meshcheryakov E.P. [Development of energy-saving technologies for drying compressed air during compression and preparation for use in industry and transport]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Khimiya*, 2017, no. 9, pp. 80-82 (in Russ.). DOI: 10.17223/24135542/9/8.

14. Kozlov V.V., Krylov P.V., Piskun E.S. [Analysis of perspective technological schemes of air preparation in systems of temperature control of launch complexes]. *Inzhenerny izhurnal: nauka i nnovatsii*, 2021, no. 9 (in Russ.). DOI: 10.18698/2308-6033-2021-9-2111.

15. Balalaev A.N., Fashchevskii N.N. [Improving the process of drying compressed air during the maintenance of passenger cars on PTS]. *Vestnik Donetsko iakademii avtomobil'nogo transporta*, 2019, no. 2, pp. 55-64 (in Russ.).

16. Kozlov V.V., Shadrin V.S., Podchufarov A.A. Express analysis of technological processes of compression and drying of wet air at the stages of design and operation of compressor stations. AIP Conference Proceedings, 2019, vol. 2141, no. 030029, pp. 1-11. DOI: 10.1063/1.5122079.

17. Dai, J., faDiao, Y. Numerical analysis of transient coupled heat and moisture transfer in textile drying with

porous relative impact jet. *Applied Thermal Engineering*, 2022, vol. 212, no. 118613. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2022.118613.

18. Kashif Shahzad M., Ding Y., Li Q., Xuan Y., Gao N., Chen G. Novel multifunctional open absorption heat pump system with compressed air dryer assisted preliminary flash regeneration-an industrial application. *Applied Thermal Engineering*, 2022, vol. 211, no. 118526. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118526.

19. Srivatsa A., Perry Y. Li. How moisture content affects the performance of a liquid piston air compressor/expander. *Journal of Energy Storage*, 2018, vol. 18, pp. 121-132. DOI: 10.1016/j.est.2018.04.017.

20. Zhan C., Yin Y., Guo X., Jin X., Zhang X. Investigation on drying performance and alternative analysis of different liquid desiccants in compressed air drying system. *Energy*, 2018, vol. 165, pp. 1-9. DOI: 10.1016/j.energy.2018.09.164.

Methods for Constructing and Properties of Unified and Individual Pressure Diagrams “Enthalpy - Moisture Content” of Compressed Air

V.N. Didenko, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

D.A. Khvorenkov, PhD in Engineering, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

I.I. Fakhraziev, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

In engineering practice, when determining the characteristics of atmospheric air, I-d Ramzin diagrams are widely used, developed for a certain average barometric pressure. Direct transfer (without recalculation) of characteristics from atmospheric I-d diagrams to compressed air leads to serious errors. For compressed air, only individual and unified pressure I-d diagrams are applicable.

Research objectives: creation of working (up to the level of algorithms) methods for constructing such I-d diagrams and establishing the boundaries of their applicability to air in a different state and at a different pressure. To construct I-d diagrams of compressed air, the atmospheric I-d diagram field is used. Humid air is assumed to be an ideal gas, the enthalpy of which does not depend on pressure. Isotherms and isoenthalps are copied from atmospheric I-d diagrams with their scale preserved. Also, the graph of the partial pressure of water vapor is copied, but its scale changes in proportion to the ratio of compressed air pressure to the accepted barometric pressure.

Section 1 gives an algorithm for constructing pressure-individual I-d diagrams with a grid of curves of constant relative humidity. A method is given for determining at a given point such an I-d diagram of relative air humidity for a different pressure. This technique makes it possible to depict compressed air relative humidity curves on an atmospheric I-d diagram.

For practical problems with the condensation of compressed air water vapor, it is convenient to use I-d diagrams unified by pressure, which are distinguished by the presence of a grid of saturated air relative humidity curves for a number of pressure values. Section 2 provides an algorithm for constructing unified I-d diagrams and gives a method for determining the relative humidity of unsaturated air at pressure P at a given point of such a diagram. The paper gives examples of the application of this technique.

Keywords: enthalpy, moisture, content air, pressure, dewpoint, temperature.

Получено 25.05.2022

Образец цитирования

Диденко В. Н., Хворенков Д. А., Фахразиев И. И. Методики построения и свойства унифицированных и индивидуальных по давлению диаграмм «энтальпия – влагосодержание» сжатого воздуха // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2022. Т. 25, № 2. С. 64–71. DOI: 10.22213/2413-1172-2022-2-64-71.

For Citation

Didenko V.N., Khvorenkov D.A., Fakhraziev I.I. [Methods for Constructing and Properties of Unified and Individual Pressure Diagrams “Enthalpy - Moisture Content” of Compressed Air]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2022, vol. 25, no. 2, pp. 64-71 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2022-2-64-71.