

Научная статья
УДК 697.93,533.275.08

АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА

Е.А. Оленев^{1,*}

¹Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Россия

*E-mail: olenevea@mail.ru

Аннотация. Предлагается аналитический метод расчета параметров влажного воздуха, которые до сих пор определяются с помощью *id*-диаграммы. Этот метод может быть использован для расчета устройств и систем кондиционирования воздуха, не пользуясь при этом указанной диаграммой. Погрешность разработанных формул приемлема для практических расчетов, что позволяет проектировать системы кондиционирования воздуха с помощью компьютерной программы.

Ключевые слова: *id*-диаграмма; влажность; воздух; кондиционер; искусственный климат.

Для цитирования: Оленев Е.А. Аналитический расчет параметров влажного воздуха // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2024. Т.10. №1. С. 59–75.

Originalarticle

ANALYTICAL CALCULATION OF HUMID AIR PARAMETERS

E.A. Olenev^{1,*}

¹Vladimir State University named after Alexander and Nikolai Stoletov, Vladimir, Russia

*E-mail: olenevea@mail.ru

Abstract. An analytical method is proposed for calculation of parameters humid air, which as up to now calculation with the help of *id*-diagram. This method it is possible for calculation of the arrangements and air-condition systems without stated diagram. The error of working out formulas is acceptability for practical calculations and enable project air-condition systems with the computer program.

Keywords: *id*-diagram; humidity; air; air-condition; artificial climate.

For citation: Olenev E.A. Analytical calculation of humid air parameters. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2024. Vol.10, No. 1. pp. 59–75.

Введение

За последнее время существенно усовершенствованы методы расчета систем кондиционирования воздуха (СКВ), а также других тепловых и аэрогидродинамических теплообменных аппаратов. Проектирование устройств, в которых в качестве рабочего тела используется воздух, трудно представить без использования *id*-диаграммы. С ее помощью можно графически рассчитать состояние влажного воздуха на каждом этапе его обработки, определить необходимую мощность сушильных и холодильных установок,

воздухообмен в промышленных, спортивных, административных, жилых и других зданиях и т.д.

При этом все расчеты, касающиеся основных параметров воздуха, ведутся с применением *id*-диаграммы, которая положена в основу графоаналитических методов расчета. Указанная диаграмма, построенная для влажного воздуха, позволяет проследить за изменением всех его параметров, задаваясь двумя известными значениями из которых, можно определить все остальные.

Применение графоаналитических методов не всегда удобно, так как затрудняется выполнение расчетов на компьютере. Предлагаемый аналитический метод расчета устраняет этот недостаток, кроме того, появляется возможность математического моделирования и управления указанными процессами и аппаратами в реальном масштабе времени.

Определение параметров влажного воздуха с помощью формул

В соответствии с *id*-диаграммой, приведенной в литературе [1], для различных значений влагосодержания, энтальпии, относительной влажности и температуры автором были разработаны следующие математические формулы.

Энтальпия влажного воздуха, если известна его температура и влагосодержание, может быть найдена следующим образом ($i = f(t, d)$)

$$i = (0,0022d + 0,998)t + 2,467d + 0,661, \quad (1)$$

где i – энтальпия влажного воздуха, кДж/кг; t – его температура, °С; d – влагосодержание, г/кг.

При изменении температуры от 14 до 100 °С и влагосодержания от 10 до 110 г/кг средняя относительная погрешность указанной формулы составляет 0,4 %.

Если известны значения температуры и влажности воздуха, то энтальпия может быть найдена из выражения ($i = f(\varphi, t)$)

$$i = (3,7 \cdot 10^{-3}\varphi + 0,85)t + \left(0,976 \ln\varphi + \frac{6\varphi}{(\varphi + 100)} + 1,828\right) \cdot \left(\frac{0,19\varphi}{\varphi + 56} + 1,102\right)^{0,306t} - 0,12(8 \cdot 10^{-5}\varphi^3 - 1,65 \cdot 10^{-2}\varphi^2 + 0,59\varphi + 26,3), \quad (2)$$

где i – энтальпия влажного воздуха, кДж/кг; t – его температура, °С; φ – относительная влажность, %.

При изменении температуры от 0 до 100 °С и влажности от 5 до 100 % средняя относительная погрешность по данной формуле составляет 3 %. Заметим, что погрешность повышается при приближении температуры к 0 °С, когда даже небольшие отклонения результата от значений на диаграмме дают ощутимое увеличение погрешности.

Зависимость влажности воздуха от величин энтальпии и влагосодержания выражается следующей формулой ($\varphi = f(i, d)$)

$$\varphi = \left[0,8d^{1,53} + 18d^{0,2} \left(\frac{1,73(d + 5,3)^{2,2}}{5 + \left(\frac{d}{4,8}\right)^{2,44}} + 1,1 - 5 \cdot 10^{-20}d^{10} \right) - 515 \right] \cdot (0,001d^{1,85} - 0,07d + 6)^{-0,05 \left(i + \frac{38d + d^{2,3} - 79}{i} - 4,22d + 22,84 - \frac{63,2}{d^2} - 0,88 \cdot 10^{-15}d^8 \right) -}$$

$$\begin{aligned}
 & -i \left(0,0145d - 9 \cdot 10^{-4}d^{1,81} + 9 \cdot 10^{-7}d^{3,3} - 2,3 \cdot 10^{-10}d^{4,5} - 8,2 \cdot 10^{-15}d^7 + 0,03 - \frac{0,07}{d} \right) \\
 & - \frac{122}{d^{0,6}} + \frac{160}{d^{0,4}} - 42,4 + 3d - 0,024d^{2,3} + \\
 & + 3,1 \cdot 10^{-4}d^{3,1} + 7,84 \cdot 10^{-8}d^5 - 1,97 \cdot 10^{-12}d^{7,2} - \frac{50}{d} + \frac{100}{d^2}, \quad (3)
 \end{aligned}$$

где φ – влажность воздуха, %; i – энтальпия влажного воздуха, кДж/кг; d – его влагосодержание, г/кг.

При изменении энтальпии от 39 до 385 кДж/кг и влагосодержания от 10 до 110 г/кг средняя относительная погрешность по данной формуле составляет 5,9 %. Погрешность увеличивается при малых значениях φ , когда, например расчетное значение относительной влажности $\varphi = 3,12$ % вместо $\varphi = 5$ % по диаграмме (разность этих значений меньше, чем погрешность показаний обычных гигрометров) дает относительную погрешность $\delta = -37,59\%$.

Если известны значения температуры и влагосодержания, то относительную влажность можно найти по формуле ($\varphi = f(t, d)$)

$$\begin{aligned}
 \varphi = & \left(26,8(d - 0,1)^{0,86} - \frac{17590}{e^{(d-65,183)} + e^{-(d-65,183)}} - \frac{114,3}{e^{(d-50)} + e^{-(d-50)}} - \frac{204}{e^{(d-90)} + e^{-(d-90)}} \right. \\
 & - \frac{146,48}{e^{(d-80)} + e^{-(d-80)}} - \frac{43,6}{e^{(d-40)} + e^{-(d-40)}} + 4,4 + \frac{61}{e^{(d-20)} + e^{-(d-20)}} \\
 & \left. + \frac{36,8}{e^{(d-30)} + e^{-(d-30)}} + \frac{9350}{e^{(d-105,731)} + e^{-(d-105,731)}} \right) \cdot \\
 & \cdot \exp - \left[\left(-0,0002d + 3 \cdot 10^{-6}d^2 - 0,00022d + 0,064 + \frac{1}{d^9} \right) t \right] + \\
 & + \frac{7,5d + 475 - \frac{979,9}{e^{(d-2)} + e^{-(d-2)}}}{t^{(0,01d+1,3)}} + 0,047d + 0,3 + 1,8 \cdot 10^{-6}d^3 - \\
 & - 3 \cdot 10^{-6}d^3 + 2 \cdot 10^{-12}d^{6,0252} - \frac{55}{e^{(d-75)} + e^{-(d-75)}} + \frac{30}{e^{(d-45)} + e^{-(d-45)}}, \quad (4)
 \end{aligned}$$

где φ – влажность воздуха, %; d – влагосодержание воздуха, г/кг; t – температура, °С; $e = 2,7182818$.

При изменении влагосодержания от 10 до 110 г/кг и температуры от 0 до 100 °С средняя относительная погрешность данной формулы $\delta = 1,5$ %.

Если известны значения влажности и влагосодержания, то температуру воздуха можно определить по формуле ($t = f(\varphi, d)$)

$$\begin{aligned}
 t = & \frac{-0,0042d^2 + 0,618d + 136,4 - \frac{37}{e^{(d-70)} + e^{-(d-70)}}}{(\varphi + 5) \left(\frac{1,02}{d^{0,307}} - \frac{0,1}{e^{(d-70)} + e^{-(d-70)}} \right)} + \frac{80 \left(\frac{0,056d^{2,26}}{6 + 0,056d^{2,3}} + 1,2 \right)}{(\varphi + 5)^{(-0,0012d + 0,765)}} - \\
 & - \varphi \left(3,7 \cdot 10^{-4}d + 0,011 + \frac{0,065}{e^{0,1(d-70)} + e^{-0,3(d-70)}} + \frac{0,59}{d^{1,5}} \right), \quad (5)
 \end{aligned}$$

где t – температура, °С; d – влагосодержание воздуха, г/кг; φ – влажность воздуха, %; $e = 2,7182818$.

При изменении влажности от 5 до 100 % и влагосодержания от 2 до 110 г/кг средняя относительная погрешность данной формулы $\delta = 1,4$ %.

Если известны энтальпия и влагосодержание, то температуру воздуха можно найти из следующей формулы ($t = f(i, d)$)

$$t = (-1,46 \cdot 10^{-3}d + 0,98)i + 0,003d^{2,048} - 2,462d + 0,8/d^{0,2}, \quad (6)$$

где t – температура, °С; d – влагосодержание воздуха, г/кг; i – энтальпия влажного воздуха, кДж/кг. При изменении влагосодержания от 2 до 110 г/кг и энтальпии от 2 до 385 кДж/кг средняя относительная погрешность данной формулы $\delta = 1,5 \%$.

Если известны энтальпия и влажность, то температуру воздуха можно вычислить по формуле ($t = f(i, \varphi)$)

$$t = \left(\frac{50}{\varphi^{0,44}} - 0,075\varphi + 6,5 \right) \cdot (\lg i)^{(0,0075\varphi + 1,66)} + \left(-1,02\varphi^{0,94} + 18,4 + 0,01\varphi^{1,934} - 9 \cdot 10^{-14}\varphi^7 - \frac{9,5}{2,7^{(\varphi-10)} + 2,7^{-(\varphi-10)}} - \frac{7}{2,7^{(\varphi-20)} + 2,7^{-(\varphi-20)}} + \frac{310}{2,7^{(\varphi-65)} + 2,7^{-(\varphi-65)}} + \frac{3,5}{2,7^{(\varphi-90)} + 2,7^{-(\varphi-90)}} \right) \lg i - \left(-2,67\varphi^{0,94} + 67,7 + 0,01\varphi^{2,12} - 2,67 \cdot 10^{-21}\varphi^{11} - \frac{35,5}{2,7^{(\varphi-10)} + 2,7^{-(\varphi-10)}} - \frac{29,56}{2,7^{(\varphi-20)} + 2,7^{-(\varphi-20)}} - \frac{9,2}{2,7^{(\varphi-30)} + 2,7^{-(\varphi-30)}} - \frac{3}{2,7^{(\varphi-40)} + 2,7^{-(\varphi-40)}} + \frac{860}{2,7^{(\varphi-65)} + 2,7^{-(\varphi-65)}} - \frac{2,5}{2,7^{(\varphi-80)} + 2,7^{-(\varphi-80)}} \right). \quad (7)$$

где t – температура, °С; φ – влажность воздуха, %; i – энтальпия влажного воздуха, кДж/кг. При изменении влажности воздуха от 5 до 100 % и энтальпии от 2 до 385 кДж/кг средняя относительная погрешность данной формулы $\delta = 1,4 \%$.

Если известны влажность и температура воздуха, то влагосодержание воздуха можно вычислить по формуле ($d = f(\varphi, t)$)

$$d = -0,012t \cdot \left(8 \cdot 10^{-5}\varphi^3 - 0,0165\varphi^2 + 0,9(1 + \varphi) \right) + (1,8\ln\varphi - 1,2) \cdot \left(\frac{1,574 \cdot 10^{-3} \cdot \varphi^{1,08}}{1,34 + \left(\frac{\varphi}{65}\right)^{1,6}} + 1,104 + 10^{-10}\varphi^{4,07} + \frac{0,02}{\varphi} - \frac{16}{(\varphi + 3)^{3,6}} + \frac{2800}{\varphi^8} \right)^{0,3015t} - \frac{0,18\varphi^{2,26}}{19 + 0,053\varphi^{2,32}} - 1,1 + 5 \cdot 10^{-21}\varphi^{10}, \quad (8)$$

где d – влагосодержание воздуха, г/кг; t – температура, °С; φ – влажность воздуха, %. При изменении влажности от 5 до 100 % и температуры от – 8 до 99 °С средняя относительная погрешность данной формулы $\delta = 2,2 \%$.

Если известны энтальпия и влажность, то влагосодержание воздуха можно вычислить по формуле $d = f(i, \varphi)$

$$d = 0,029\varphi^{0,724} \cdot i^{(1,979\varphi^{-0,124})} - 0,8i^{2,56} \cdot \frac{1}{\varphi \left(\frac{10,2}{\varphi^{0,9}} + 0,0024\varphi^{1,3+2,18} \right)}, \quad (9)$$

где d – влагосодержание воздуха, г/кг; φ – относительная влажность воздуха, %; i – энтальпия влажного воздуха, кДж/кг. При изменении влажности воздуха от 10 до 100 % и энтальпии от 39 до 385 кДж/кг средняя относительная погрешность данной формулы $\delta = 1,8 \%$.

Для нахождения влагосодержания, если известно парциальное давление влажного воздуха, можно воспользоваться следующей формулой

$$d = 6,5p - 0,12, \quad (10)$$

где d – влагосодержание воздуха, г/кг; p – парциальное давление влажного воздуха, кПа.

Математические выражения получились громоздкими, однако, будучи введенными один раз в память вычислительного устройства, позволяют не только легко находить нужные параметры воздуха, но и прогнозировать работу различных систем кондиционирования, а также управлять их работой в режиме реального времени.



Для оценки погрешности аналитического расчета параметров влажного воздуха по уравнениям (1) – (9) были проведены вычисления для различных значений переменных, результаты которых сведены в таблицы 1 – 8. Обозначения с индексом «д» соответствуют данным диаграммы, номер в круглых скобках показывает номер формулы, по которой проводились вычисления, относительная погрешность обозначена буквой δ .

Таблица 1 – Зависимость энтальпии воздуха от его температуры и влагосодержания

Энтальпия воздуха i , кДж/кг; $i = f(t, d)$											
$d = 10$ г/кг			$d = 20$ г/кг			$d = 30$ г/кг			$d = 40$ г/кг		
$i_d, ^\circ\text{C}$	(1)	$\delta, \%$	$i_d, ^\circ\text{C}$	(1)	$\delta, \%$	$i_d, ^\circ\text{C}$	(1)	$\delta, \%$	$i_d, ^\circ\text{C}$	(1)	$\delta, \%$
95,5	96,73	1,26	140,3	140,66	0,21	178,1	175,7	-1,31	192,7	192,7	0,00
80,5	81,43	1,22	123,1	122,94	-0,20	158,8	158,7	-0,05	174,3	174,3	-0,02
66,6	68,17	2,33	106,4	106,27	-0,15	142,5	141,7	-0,53	164,2	164,5	0,15
59	60,83	2,96	98	98,98	0,95	134,1	134,7	0,53	158,4	158,0	-0,25
54	54,91	1,59	92,2	93,77	1,72	126,5	125,7	-0,63	153,4	153,1	-0,17
49,86	50,83	1,95	88	89,08	1,23	121,5	122,0	0,42	149,2	149,3	0,09
46,9	47,77	1,80	84,6	84,60	0	118,2	118,7	0,46	146,2	146,0	-0,13
44,4	45,22	1,82	81,3	82,30	1,25	115,2	114,7	-0,38	144,1	143,9	-0,19
42,3	42,67	0,83	79,2	80,22	1,30	112,7	112,3	-0,33	141,6	140,6	-0,72
40,6	40,63	-0,03	77,5	78,14	0,80	110,6	110,0	-0,56	139,1	138,4	-0,48
39,4	39,61	0,57	75,4	76,05	0,84	108,5	108,1	-0,31			

Энтальпия воздуха i , кДж/кг; $i = f(t, d)$											
$d = 50$ г/кг			$d = 60$ г/кг			$d = 70$ г/кг			$d = 80$ г/кг		
$i_d, ^\circ\text{C}$	(1)	$\delta, \%$	$i_d, ^\circ\text{C}$	(1)	$\delta, \%$	$i_d, ^\circ\text{C}$	(1)	$\delta, \%$	$i_d, ^\circ\text{C}$	(1)	$\delta, \%$
224,6	225,4	0,36	256,4	256,6	0,07	287,4	287,4	-0,01	297,1	297,2	0,05
206,1	206,0	-0,07	236,7	237,4	0,27	267,3	267,8	0,18	285,3	285,8	0,17
195,7	195,5	-0,10	225,8	226,1	0,11	256,0	256,3	0,11	278,2	277,9	-0,13
189,0	188,8	-0,07	218,7	218,7	0,01	248,5	248,2	-0,09	272,4	272,0	-0,13
183,5	183,8	0,17	213,7	213,1	-0,28	242,6	242,5	-0,05	267,3	267,3	-0,01
179,3	179,4	0,04	209,1	209,1	0,03	238,4	238,2	-0,08	263,6	263,8	0,08
176,4	176,1	-0,18	205,7	205,2	-0,27	235,1	234,4	-0,28	260,2	260,2	0,02
173,5	173,6	0,11	202,8	201,8	-0,50	232,1	231,5	-0,26	257,3	257,9	0,24
171,4	170,5	-0,48	200,3	200,1	-0,09	229,2	228,1	-0,49	254,4	255,5	0,46
168,4	168,3	-0,06	197,8	197,3	-0,25	225,8	225,2	-0,29			

Энтальпия воздуха i , кДж/кг; $i = f(t, d)$								
$d = 90$ г/кг			$d = 100$ г/кг			$d = 110$ г/кг		
$i_d, ^\circ\text{C}$	(1)	$\delta, \%$	$i_d, ^\circ\text{C}$	(1)	$\delta, \%$	$i_d, ^\circ\text{C}$	(1)	$\delta, \%$
326,4	326,7	0,10	356,2	355,8	-0,11	384,2	384,9	0,17
314,7	313,6	-0,34	343,6	343,6	0,00	372,5	372,5	-0,01
307,5	306,4	-0,37	336,0	336,3	0,07	364,1	363,8	-0,09
301,7	300,4	-0,41	329,3	329,0	-0,11	357,4	357,0	-0,12
296,7	295,6	-0,34	324,3	324,7	0,12	352,8	352,6	-0,05
293,3	291,5	-0,63	320,5	320,4	-0,03	349,0	348,3	-0,21
288,7	288,5	-0,08	316,3	316,8	0,14	345,3	344,0	-0,38
285,8	285,5	-0,10	313,0	314,4	0,43	341,9	341,0	-0,27
283,2	282,5	-0,27	310,1	311,3	0,40	339,4	338,4	-0,30

Таблица 2 – Зависимость энтальпии воздуха от его относительной влажности и температуры

Энтальпия воздуха i , кДж/кг; $i = f(\varphi, t)$												
$t, ^\circ\text{C}$	$\varphi = 5\%$			$\varphi = 10\%$			$\varphi = 20\%$			$\varphi = 30\%$		
	$i_{\text{д}}$, кДж/кг	(2)	$\delta, \%$	$i_{\text{д}}$, кДж/кг	(2)	$\delta, \%$	$i_{\text{д}}$, кДж/кг	(2)	$\delta, \%$	$i_{\text{д}}$, кДж/кг	(2)	$\delta, \%$
0	0,25	0,22	-10,87	0,67	0,95	41,07	1,7	1,90	11,47	2,9	2,77	-4,31
10	11	10,19	-7,39	11,7	11,93	1,92	13,4	14,25	6,36	15,9	16,37	2,93
20	22	20,79	-5,51	24	23,87	-0,55	27,6	28,30	2,53	31,8	32,38	1,84
30	33,5	32,52	-2,92	36,9	37,22	0,85	44,3	44,95	1,46	52,4	52,31	-0,17
40	46	45,67	-0,72	52,5	52,61	0,20	65	65,61	0,94	77	78,52	1,97
50	60,2	60,66	0,77	70	70,97	1,39	92	92,47	0,51	111,8	114,85	2,73
60	75,8	78,12	3,06	92,2	93,68	1,61	128,2	128,86	0,52	166,3	167,46	0,70
70	94,5	98,94	4,70	123,6	122,70	-0,73	180,3	179,98	-0,18	240,5	246,28	2,40
80	120,5	124,42	3,25	163,4	160,93	-1,51	251,8	253,79	0,79	360,3	367,29	1,94
90	151,7	156,36	3,07	217	212,56	-2,05	357,8	362,58	1,34			
100	196	197,38	0,71	272	283,72	4,31						

Энтальпия воздуха i , кДж/кг; $i = f(\varphi, t)$												
$t, ^\circ\text{C}$	$\varphi = 40\%$			$\varphi = 50\%$			$\varphi = 60\%$			$\varphi = 70\%$		
	$i_{\text{д}}$, кДж/кг	(2)	$\delta, \%$	$i_{\text{д}}$, кДж/кг	(2)	$\delta, \%$	$i_{\text{д}}$, кДж/кг	(2)	$\delta, \%$	$i_{\text{д}}$, кДж/кг	(2)	$\delta, \%$
0	3,8	3,71	-2,41	4,6	4,70	2,18	5,9	5,72	-2,97	6,7	6,74	0,63
10	18,1	18,43	1,85	20,5	20,48	-0,10	23	22,49	-2,24	24	24,43	1,78
20	35,5	36,31	2,29	39,1	40,11	2,59	42	43,77	4,21	46,3	47,26	2,08
30	58,1	59,44	2,31	64,2	66,33	3,32	70,9	72,95	2,89	77,1	79,27	2,81
40	88	91,31	3,76	100,6	103,82	3,21	113,1	115,95	2,52	126,5	127,60	0,87
50	133,2	137,71	3,39	156,7	160,58	2,48	179,3	183,10	2,12	204,1	205,03	0,45
60	203,6	208,32	2,32	239,2	250,29	4,64	281,6	292,48	3,86	323,9	334,25	3,20
65	249	257,38	3,36	299,2	314,27	5,04	353,6	372,12	5,24			

Энтальпия воздуха i , кДж/кг; $i = f(\varphi, t)$									
$t, ^\circ\text{C}$	$\varphi = 80\%$			$\varphi = 90\%$			$\varphi = 100\%$		
	$i_{\text{д}}$, кДж/кг	(2)	$\delta, \%$	$i_{\text{д}}$, кДж/кг	(2)	$\delta, \%$	$i_{\text{д}}$, кДж/кг	(2)	$\delta, \%$
0	7,1	7,71	8,57	7,9	7,71	8,53	9,2	9,29	0,94
10	25,1	26,26	4,64	27,2	26,26	2,79	29,3	29,46	0,54
20	49	50,56	3,19	52,8	50,56	1,59	57	56,45	-0,96
30	84,6	85,25	0,77	91,3	85,25	-0,48	100,8	96,09	-4,67
40	137,9	138,72	0,60	150	138,72	-0,49	166,4	159,20	-4,3
50	226,3	226,19	-0,05	248	226,19	-0,61	278,4	265,84	-4,51
55	286,8	290,56	1,31	318	290,56	0,29			

Таблица 3 – Зависимость относительной влажности воздуха от энтальпии и влагосодержания

Относительная влажность воздуха $\varphi, \%$; $\varphi = f(i, d)$												
$\varphi, \%$	$d = 10 \text{ г/кг}$			$d = 20 \text{ г/кг}$			$d = 30 \text{ г/кг}$			$d = 40 \text{ г/кг}$		
	$i_{\text{д}}$, кДж/кг	(3)	$\delta, \%$	$i_{\text{д}}$, кДж/кг	(3)	$\delta, \%$	$i_{\text{д}}$, кДж/кг	(3)	$\delta, \%$	$i_{\text{д}}$, кДж/кг	(3)	$\delta, \%$
5	95,5	3,12	-37,59	140,4	6,27	25,33	140,4	6,78	35,62			
10	80,4	8,27	-17,25	123,2	11,24	12,38	123,2	12,57	25,67	192,7	12,29	22,91
20	66,6	19,15	-4,23	106,4	21,84	9,21	106,4	21,89	9,46	174,3	22,61	13,07
30	59,1	30,59	1,96	98,0	32,08	6,95	98,0	30,63	2,10	165,8	31,58	5,2
40	54,1	41,82	4,55	92,2	42,70	6,75	92,2	42,46	6,14	158,4	43,08	7,69
50	53,3	54,11	1,5	88,0	52,67	5,33	88,0	53,25	6,51	153,4	53,50	7,01
60	47,3	63,28	5,4	84,6	62,40	4,00	84,6	62,09	3,49	149,2	64,23	7,05
70	44,9	72,7	3,86	81,3	73,96	5,65	81,3	71,08	1,54	146,2	73,03	4,32
80	42,9	81,84	2,3	79,2	82,21	2,76	79,2	79,83	-0,22	144,1	80,03	0,04
90	40,9	91,19	1,3	77,5	89,43	0,63	77,5	87,92	-2,31	141,6	89,31	-0,76
100	39,4	99,24	-0,76	75,4	99,27	0,73	75,4	96,80	-3,20	139,1	99,61	-0,39

Относительная влажность воздуха $\varphi, \%$; $\varphi = f(i, d)$												
$\varphi, \%$	$d = 50 \text{ г/кг}$			$d = 60 \text{ г/кг}$			$d = 70 \text{ г/кг}$			$d = 80 \text{ г/кг}$		
	$i_{\text{д}}$, кДж/кг	(3)	$\delta, \%$	$i_{\text{д}}$, кДж/кг	(3)	$\delta, \%$	$i_{\text{д}}$, кДж/кг	(3)	$\delta, \%$	$i_{\text{д}}$, кДж/кг	(3)	$\delta, \%$
10	224,6	11,63	16,33	256,4	10,39	3,85	287,4	9,03	-9,72			
20	206,1	21,76	8,81	236,7	21,15	5,73	267,3	20,13	0,65	297,1	19,61	1,94
30	195,7	32,93	9,77	225,8	32,65	8,83	256,0	31,65	5,49	285,3	31,38	4,60
40	189,0	43,47	8,68	218,7	43,67	9,17	248,5	42,75	6,88	278,2	41,35	3,37
50	183,9	53,71	7,41	213,7	53,66	7,31	242,6	53,92	7,84	272,4	51,68	3,35
60	179,3	65,24	8,74	209,1	64,77	7,95	238,4	63,55	5,91	267,3	62,39	3,98
70	176,4	73,83	5,47	205,7	74,20	6,01	235,1	72,39	3,41	263,6	71,72	2,46
80	173,5	83,50	4,37	202,8	83,51	4,38	232,1	81,04	1,30	260,2	81,08	1,35
90	171,4	91,12	1,25	200,3	92,33	2,59	229,2	90,63	0,70	257,3	90,16	0,17
100	168,4	102,90	2,90	197,8	101,99	1,99	225,8	102,84	2,84	254,4	99,99	0,01

Относительная влажность воздуха φ , %; $\varphi = f(I, d)$									
φ , %	$d = 90$ г/кг			$d = 100$ г/кг			$d = 110$ г/кг		
	$i_{д'}$ кДж/кг	(3)	δ , %	$i_{д'}$ кДж/кг	(3)	δ , %	$i_{д'}$ кДж/кг	(3)	δ , %
20	326,4	19,33	3,34	356,2	18,73	6,36	384,2	20,50	2,49
30	314,7	30,96	3,20	343,6	30,83	2,78	372,5	30,97	3,22
40	307,5	40,49	1,23	336,0	40,72	1,80	364,3	41,41	3,52
50	301,7	50,20	0,40	329,3	51,75	3,51	359,1	49,93	-0,15
60	296,7	60,14	0,24	324,3	61,74	2,90	353,2	61,57	2,62
70	293,3	67,74	3,24	320,5	70,35	0,50	349,0	71,48	2,12
80	288,7	79,60	0,50	316,3	81,21	1,51	345,3	81,72	2,14
90	285,8	88,10	2,11	313,0	90,97	1,08	341,9	91,95	2,17
100	283,2	96,02	3,98	310,1	100,38	0,38	339,4	100,44	0,44

Таблица 4 – Зависимость относительной влажности воздуха от температуры и влагосодержания

Относительная влажность воздуха φ , %; $\varphi = f(t, d)$											
$d = 2$ г/кг			$d = 10$ г/кг			$d = 20$ г/кг			$d = 30$ г/кг		
$\varphi_{д'}$, %	(4)	δ , %	$\varphi_{д'}$, %	(4)	δ , %	$\varphi_{д'}$, %	(4)	δ , %	$\varphi_{д'}$, %	(4)	δ , %
5	4,97	-0,57	5	5,14	2,72	5	4,84	-3,15	5	4,98	-0,46
10	10,46	4,60	10	10,00	0	10	9,54	-4,65	10	9,62	-3,83
20	20,21	1,05	20	19,48	-2,61	20	20,76	3,82	20	19,84	-0,80
30	31,25	4,17	30	28,90	-3,66	30	29,90	-0,34	30	30,15	0,48
40	40,96	2,41	40	40,15	0,39	40	39,03	-2,42	40	40,23	0,58
50	49,48	-1,03	50	50,66	1,31	50	49,80	-0,41	50	50,19	0,37
			60	60,50	0,84	60	62,33	3,89	60	59,01	-1,65
			70	70,35	0,49	70	71,17	1,67	70	71,53	2,18
			80	82,05	2,57	80	79,53	-0,59	80	80,73	0,91
			90	93,10	3,44	90	88,92	-1,20	90	90,68	0,75
			100	99,31	-0,69	100	99,48	-0,52	100	99,23	-0,77

Относительная влажность воздуха φ , %; $\varphi = f(t, d)$											
$d = 40$ г/кг			$d = 50$ г/кг			$d = 60$ г/кг			$d = 70$ г/кг		
$\varphi_{д'}$, %	(4)	δ , %	$\varphi_{д'}$, %	(4)	δ , %	$\varphi_{д'}$, %	(4)	δ , %	$\varphi_{д'}$, %	(4)	δ , %
10	9,81	-1,94	10	10,08	0,84	10	10,23	2,33	10	9,97	-0,28
20	20,06	0,31	20	20,28	1,39	20	19,72	-1,42	20	19,66	-1,71
30	30,46	1,54	30	30,81	2,71	30	30,39	1,30	30	29,26	-2,47
40	40,64	1,61	40	40,86	2,16	40	40,40	1,00	40	39,66	-0,86
50	50,41	0,82	50	50,54	1,07	50	50,66	1,33	50	49,86	-0,28
60	60,24	0,40	60	61,19	1,98	60	60,53	0,88	60	59,20	-1,33
70	69,97	-0,05	70	70,71	1,02	70	71,41	2,02	70	69,10	-1,28
80	77,35	-3,32	80	78,68	-1,65	80	80,82	1,02	80	77,76	-2,81
90	89,97	-0,03	90	90,19	0,21	90	88,50	-1,66	90	89,65	-0,39
100	99,56	-0,44	100	99,47	-0,53	100	99,78	-0,22	100	101,00	1,00

Относительная влажность воздуха φ , %; $\varphi = f(t, d)$											
$d = 80$ г/кг			$d = 90$ г/кг			$d = 100$ г/кг			$d = 110$ г/кг		
$\varphi_{д'}$, %	(4)	δ , %	$\varphi_{д'}$, %	(4)	δ , %	$\varphi_{д'}$, %	(4)	δ , %	$\varphi_{д'}$, %	(4)	δ , %
20	20,26	1,29	20	19,56	-2,19	20	20,16	0,81	20	19,97	-0,14
30	30,48	1,61	30	30,47	1,56	30	29,77	-0,76	30	28,88	-3,74
40	41,22	3,05	40	39,52	-1,19	40	39,65	-0,87	40	38,55	-3,63
50	51,54	3,07	50	49,47	-1,06	50	50,31	0,62	50	48,73	-2,54
60	62,32	3,87	60	59,45	-0,91	60	59,14	-1,43	60	57,25	-4,59
70	71,72	2,46	70	70,00	0,00	70	69,73	-0,38	70	67,54	-3,52
80	82,24	2,81	80	78,77	-1,54	80	80,48	0,60	80	79,97	-0,03
90	90,87	0,96	90	88,71	-1,43	90	88,63	-1,52	90	89,97	-0,03
100	99,96	-0,04	100	99,99	-0,01	100	100,1	0,10	100	99,85	-0,15

Таблица 5 – Зависимость температуры воздуха от относительной влажности и влагосодержания

Температура воздуха $t, ^\circ\text{C}; t = f(\varphi, d)$												
$\varphi, \%$	$d = 2 \text{ г/кг}$			$d = 10 \text{ г/кг}$			$d = 20 \text{ г/кг}$			$d = 30 \text{ г/кг}$		
	$t_{\text{д}}, ^\circ\text{C}$	(5)	$\delta, \%$	$t_{\text{д}}, ^\circ\text{C}$	(5)	$\delta, \%$	$t_{\text{д}}, ^\circ\text{C}$	(5)	$\delta, \%$	$t_{\text{д}}, ^\circ\text{C}$	(5)	$\delta, \%$
5	37	36,69	-0,85	70	69,81	-0,27	87	86,59	-0,47	95	96,42	1,49
10	24,9	25,16	1,03	55	54,74	-0,47	70	70,16	0,23	79	79,55	0,69
20	14,5	13,82	-4,94	42	40,20	-4,48	54	53,96	-0,07	63	62,67	-0,52
30	6,8	7,33	7,29	34	32,64	-4,01	47	45,38	-3,45	54	53,61	-0,72
40	2,5	2,61	4,07	29	27,78	-4,40	42	39,81	-5,20	48	47,67	-0,69
50	0	-1,28		25	24,29	-2,93	37,5	35,80	-4,54	44,5	43,35	-2,58
60				22	21,60	-1,86	33	32,70	-0,92	41	40,00	-2,44
70				19,5	19,42	-0,39	31	30,19	-2,60	38	37,28	-1,89
80				17	17,60	3,42	29	28,10	-3,09	35,5	35,01	-1,39
90				15	16,03	6,45	27	26,32	-2,53	33	33,05	0,15
100				14	14,66	4,48	25	24,75	-0,99	32	31,34	-2,07

Температура воздуха $t, ^\circ\text{C}; t = f(\varphi, d)$												
$\varphi, \%$	$d = 40 \text{ г/кг}$			$d = 50 \text{ г/кг}$			$d = 60 \text{ г/кг}$			$d = 70 \text{ г/кг}$		
	$t_{\text{д}}, ^\circ\text{C}$	(5)	$\delta, \%$	$t_{\text{д}}, ^\circ\text{C}$	(5)	$\delta, \%$	$t_{\text{д}}, ^\circ\text{C}$	(5)	$\delta, \%$	$t_{\text{д}}, ^\circ\text{C}$	(5)	$\delta, \%$
10	86	86,58	0,67	91,5	92,22	0,78	95,5	96,76	1,32	99	100,83	1,85
20	69	69,30	0,44	74	74,66	0,90	78,5	78,94	0,57	82	83,90	2,32
30	60	59,92	-0,13	64,5	65,05	0,85	68,5	69,09	0,86	72,2	74,17	2,72
40	54	53,73	-0,50	58,5	58,66	0,28	62	62,48	0,78	65,5	67,38	2,87
50	49,5	49,20	-0,61	54	53,97	-0,06	57	57,59	1,03	60,1	62,15	3,42
60	46	45,67	-0,73	50	50,28	0,57	53,5	53,72	0,41	56,3	57,87	2,80
70	43	42,79	-0,50	47	47,27	0,58	50	50,53	1,06	53	54,22	2,30
80	41	40,36	-1,55	44,8	44,73	-0,16	47	47,82	1,74	50,5	51,01	1,01
90	38	38,28	0,73	42	42,53	1,27	45,5	45,46	-0,08	47,5	48,12	1,32
100	36	36,44	1,23	40	40,60	1,49	43	43,37	0,86	45	45,49	1,09

Температура воздуха $t, ^\circ\text{C}; t = f(\varphi, d)$												
$\varphi, \%$	$d = 80 \text{ г/кг}$			$d = 90 \text{ г/кг}$			$d = 100 \text{ г/кг}$			$d = 110 \text{ г/кг}$		
	$t_{\text{д}}, ^\circ\text{C}$	(5)	$\delta, \%$	$t_{\text{д}}, ^\circ\text{C}$	(5)	$\delta, \%$	$t_{\text{д}}, ^\circ\text{C}$	(5)	$\delta, \%$	$t_{\text{д}}, ^\circ\text{C}$	(5)	$\delta, \%$
20	84,5	85,55	1,24	87	87,91	1,05	89	89,64	0,72	91	90,77	-0,25
30	74,8	75,48	0,91	77	77,82	1,07	79	79,53	0,67	81	80,67	-0,40
40	68	68,68	1,00	70	70,99	1,41	73	72,66	-0,46	74	73,79	-0,28
50	63	63,60	0,96	65	65,87	1,34	67	67,51	0,77	68,5	68,62	0,18
60	59	59,57	0,96	61	61,81	1,32	63	63,41	0,65	65	64,49	-0,79
70	56	56,23	0,41	57,6	58,44	1,45	60	60,00	0,00	61,5	61,05	-0,73
80	53	53,38	0,71	55	55,55	1,01	57	57,08	0,14	58	58,10	0,17
90	51	50,88	-0,23	52,5	53,03	1,01	55	54,52	-0,86	56	55,50	-0,88
100	49	48,66	-0,69	50	50,79	1,58	52,5	52,24	-0,49	53	53,19	0,36

Таблица 6 – Зависимость температуры воздуха от энтальпии и влагосодержания

Температура воздуха $t, ^\circ\text{C}; t = f(i, d)$											
$d = 2 \text{ г/кг}$			$d = 10 \text{ г/кг}$			$d = 20 \text{ г/кг}$			$d = 30 \text{ г/кг}$		
$t_d, ^\circ\text{C}$	(6)	$\delta, \%$	$t_d, ^\circ\text{C}$	(6)	$\delta, \%$	$t_d, ^\circ\text{C}$	(6)	$\delta, \%$	$t_d, ^\circ\text{C}$	(6)	$\delta, \%$
36	36,7	2	70	68,85	-1,64	87	86,04	-1,10	95	96,44	1,51
22	22,4	1,8	55	53,88	-2,03	70	69,71	-0,41	79	78,39	-0,77
11	12,5		42	40,54	-3,49	54	53,77	-0,42	63	63,10	0,15
5,8	6,8		34,6	33,25	-3,89	47	45,81	-2,54	57,5	58,00	0,86
1,8	3,1		29	28,40	-2,07	42	40,63	-3,27	48	48,19	0,39
-1	0,3		25	24,36	-2,58	37,5	36,25	-3,34	44,5	43,48	-2,29
-3	-2,2		22	21,52	-2,16	33	33,06	0,18	41,3	40,34	-2,50
			19,5	19,10	-2,07	31	29,87	-3,64	35,5	37,21	4,80
			17	17,07	0,44	29	27,88	-3,86	35,4	35,24	-0,44
			15	15,05	0,35	27	26,29	-2,64	33	33,28	0,86
			14	14,24	1,74	25	24,29	-2,82	32	31,32	-2,12

Температура воздуха $t, ^\circ\text{C}; t = f(I, d)$											
$d = 40 \text{ г/кг}$			$d = 50 \text{ г/кг}$			$d = 60 \text{ г/кг}$			$d = 70 \text{ г/кг}$		
$t_d, ^\circ\text{C}$	(6)	$\delta, \%$	$t_d, ^\circ\text{C}$	(6)	$\delta, \%$	$t_d, ^\circ\text{C}$	(6)	$\delta, \%$	$t_d, ^\circ\text{C}$	(6)	$\delta, \%$
86	85,26	-0,86	91,5	90,01	-1,63	95,5	94,61	-0,93	99	98,34	-0,67
69	68,27	-1,06	74	73,29	-0,96	78,5	77,04	-1,86	82	80,68	-1,61
60	59,00	-1,66	64,5	63,79	-1,10	68,5	67,32	-1,72	72	70,75	-1,73
54	53,60	-0,75	58,5	57,71	-1,35	62	60,96	-1,67	65	64,13	-1,34
49,5	48,96	-1,08	54	52,77	-2,28	57	56,48	-0,92	60	58,98	-1,70
46	45,10	-1,95	50	48,97	-2,06	53,5	52,36	-2,13	56,3	55,30	-1,77
43	42,40	-1,40	47	46,31	-1,47	50	49,37	-1,26	53	52,36	-1,20
41	40,47	-1,30	44,8	43,65	-2,57	47	46,75	-0,52	50,5	49,79	-1,41
38	38,15	0,40	42	41,75	-0,60	45,5	44,51	-2,18	47,5	47,21	-0,60
36	35,83	-0,46	40	39,09	-2,28	43	42,64	-0,84	45	44,27	-1,62

Температура воздуха $t, ^\circ\text{C}; t = f(I, d)$											
$d = 80 \text{ г/кг}$			$d = 90 \text{ г/кг}$			$d = 100 \text{ г/кг}$			$d = 110 \text{ г/кг}$		
$t_d, ^\circ\text{C}$	(6)	$\delta, \%$	$t_d, ^\circ\text{C}$	(6)	$\delta, \%$	$t_d, ^\circ\text{C}$	(6)	$\delta, \%$	$t_d, ^\circ\text{C}$	(6)	$\delta, \%$
84,5	83,50	-1,18	87	85,89	-1,28	89	88,57	-0,48	91	89,81	-1,31
74,8	73,37	-1,91	76	75,93	-0,09	79	78,09	-1,16	81	80,20	-0,99
68	67,22	-1,14	70	69,89	-0,16	73	71,80	-1,65	74	73,33	-0,90
63	62,16	-1,33	65	64,91	-0,14	67	66,20	-1,19	68,5	67,84	-0,96
59	57,82	-2,00	61	60,64	-0,59	63,5	62,01	-2,34	65	64,06	-1,44
56	54,56	-2,56	57,5	57,80	0,52	60	58,87	-1,89	61,5	60,97	-0,86
53	51,67	-2,51	55	53,89	-2,02	57	56,07	-1,63	58	57,88	-0,20
51	49,86	-2,23	52,5	51,40	-2,10	55	53,97	-1,87	55,6	55,14	-0,83
49	48,05	-1,93	50	49,62	-0,76	52,5	51,28	-2,32	53,5	53,08	-0,79

Таблица 7 – Зависимость температуры воздуха от энтальпии и относительной влажности

Температура воздуха t , °C; $t = f(I, \varphi)$											
$\varphi = 5 \%$			$\varphi = 10 \%$			$\varphi = 20 \%$			$\varphi = 30 \%$		
$t_{д}, °C$	(7)	$\delta, \%$	$t_{д}, °C$	(7)	$\delta, \%$	$t_{д}, °C$	(7)	$\delta, \%$	$t_{д}, °C$	(7)	$\delta, \%$
37	36,87	-0,35	24,9	24,80	-0,41	14,5	14,31	-1,34	6,5	6,39	-1,66
70	70,20	0,28	55	55,87	1,58	42	42,58	1,37	34,8	35,19	1,12
87	86,80	-0,23	70	69,67	-0,47	54	54,31	0,58	47	46,54	-0,99
97	97,59	0,60	79	78,31	-0,87	63	62,11	-1,40	54,5	54,66	0,30
			86	85,10	-1,05	69	67,73	-1,84	60	58,34	-2,77
			91,5	90,58	-1,00	74	72,54	-1,98	64,5	63,87	-0,98
			95,5	95,42	-0,08	78,4	76,59	-2,31	68,5	67,37	-1,65
			99	99,66	0,66	82	80,22	-2,17	72	71,18	-1,14
						84,5	83,42	-1,28	74,8	74,22	-0,77
						87	86,32	-0,78	76	77,01	1,33
						89	89,04	0,04	79	79,55	0,69
						91	91,43	0,47	81	81,91	1,13

Температура воздуха t , °C; $t = f(I, \varphi)$											
$\varphi = 40 \%$			$\varphi = 50 \%$			$\varphi = 60 \%$			$\varphi = 70 \%$		
$t_{д}, °C$	(7)	$\delta, \%$	$t_{д}, °C$	(7)	$\delta, \%$	$t_{д}, °C$	(7)	$\delta, \%$	$t_{д}, °C$	(7)	$\delta, \%$
	3,28	12,99	0,8	1,20	49,58	-7	-6,23	-11,07	19,5	19,25	-1,28
29,6	30,67	3,62	25	27,67	10,68	22	23,03	4,69	31	29,82	-3,82
42	41,22	-1,87	37,5	37,92	1,13	33	33,65	1,96	38	36,73	-3,33
48	48,09	0,20	44,5	44,43	-0,16	41	40,40	-1,46	43	41,81	-2,77
54	53,25	-1,39	49,5	49,43	-0,14	46	45,44	-1,21	47	46,00	-2,12
58,5	57,47	-1,77	54	53,47	-0,99	50	49,62	-0,77	50	49,58	-0,85
62	61,07	-1,51	57	57,01	0,01	53,5	53,22	-0,52	53	52,77	-0,43
65	64,29	-1,10	60	60,05	0,08	56,3	56,40	0,18	56	55,59	-0,74
68	67,20	-1,17	63	62,88	-0,19	59	59,24	0,41	57,5	58,28	1,35
70	69,84	-0,23	65	65,44	0,68	61	61,88	1,44	60	60,56	0,93
73	72,21	-1,09	67	67,68	1,01	63,5	64,18	1,08	62,5	62,78	0,45

Температура воздуха t , °C; $t = f(I, \varphi)$								
$\varphi = 80 \%$			$\varphi = 90 \%$			$\varphi = 100 \%$		
$t_{д}, °C$	(7)	$\delta, \%$	$t_{д}, °C$	(7)	$\delta, \%$	$t_{д}, °C$	(7)	$\delta, \%$
	17,88	2,19	15	14,91	-0,61	14	14,27	1,94
28,9	28,11	-2,72	27	25,77	-4,55	24,9	24,20	-2,83
35,5	34,72	-2,19	33	32,61	-1,18	31,6	30,60	-3,16
40,9	39,70	-2,94	38	37,73	-0,70	36,5	35,34	-3,19
44,8	43,65	-2,57	42	41,90	-0,25	40	39,19	-2,02
47	47,12	0,25	45,5	45,44	-0,14	43	42,61	-0,91
50,5	50,22	-0,56	47,5	48,60	2,32	45	45,45	1,00
53	52,91	-0,16	51	51,47	0,92	49	48,26	-1,51



55	55,43	0,78	52,5	53,98	2,83	50	50,62	1,24
----	-------	------	------	-------	------	----	-------	------

Таблица 8 – Зависимость влагосодержания воздуха от относительной влажности и температуры

Влагосодержание воздуха d , г/кг; $d = f(\varphi, t)$												
$\varphi, \%$	$d_d = 2 \text{ г/кг}$			$d_d = 10 \text{ г/кг}$			$d_d = 20 \text{ г/кг}$			$d_d = 30 \text{ г/кг}$		
	t_d	(8)	$\delta, \%$	t_d	(8)	$\delta, \%$	t_d	(8)	$\delta, \%$	t_d	(8)	$\delta, \%$
5	37	1,95	-2,53	70	10,57	5,70	86,7	21,11	5,54	95	29,11	-2,96
10	24,9	2,13	6,43	54,9	11,00	10,03	70	21,86	9,32	79	31,95	6,49
20	14,6	1,75	-12,67	42	10,34	3,37	54	19,80	-1,01	63	30,92	3,06
30	7,7	1,76	-11,89	34,8	10,07	0,66	46,7	20,15	0,74	54,1	29,97	-0,11
40	3,5	2,01	0,61	29,3	9,82	-1,80	41,4	20,34	1,70	48	29,41	-1,96
50	0,6	2,21	10,74	25	9,70	-2,98	37,4	20,62	3,09	44,5	30,84	2,81
60	-2	2,25	12,48	22	9,94	-0,59	33,2	19,70	-1,49	41	30,82	2,73
70	-4,6	2,09	4,68	19,5	10,13	1,27	31	20,46	2,30	37,7	30,10	0,33
80	-5,8	2,00	-0,21	17	9,99	-0,08	28,7	20,57	2,86	35,4	30,33	1,11
90	-6,7	1,97	-1,38	15	9,93	-0,68	26,6	20,50	2,49	33,2	30,18	0,59
100	-7,9	2,12	6,18	13,6	10,16	1,64	25	20,77	3,83	31,5	30,52	1,74

Влагосодержание воздуха d , г/кг; $d = f(\varphi, t)$												
$\varphi, \%$	$d_d = 40 \text{ г/кг}$			$d_d = 50 \text{ г/кг}$			$d_d = 60 \text{ г/кг}$			$d_d = 70 \text{ г/кг}$		
	t_d	(8)	$\delta, \%$	t_d	(8)	$\delta, \%$	t_d	(8)	$\delta, \%$	t_d	(8)	$\delta, \%$
10	85,6	41,74	4,35	91,3	52,27	4,54	95,4	61,26	2,11	99	70,31	0,44
20	69	41,00	2,49	73,6	50,56	1,12	78,3	62,32	3,86	81,5	71,67	2,38
30	60	40,51	1,28	64,5	50,61	1,22	68,5	61,39	2,31	71,5	70,77	1,10
40	54	40,54	1,35	58,5	51,18	2,35	62	61,10	1,83	65	70,95	1,36
50	49,5	40,52	1,30	54	51,46	2,93	57	60,17	0,28	60	70,20	0,28
60	46	40,62	1,55	50	50,40	0,79	53,5	60,66	1,11	56,3	70,22	0,32
70	43	40,43	1,08	47	50,27	0,54	50	59,04	-1,60	53	69,21	-1,13
80	41	41,52	3,79	44,8	51,14	2,28	47,5	59,19	-1,36	50,5	69,50	-0,71
90	38	39,64	-0,90	42	49,54	-0,93	45,5	60,03	0,06	48	68,77	-1,75
100	36	39,57	-1,08	40	49,64	-0,72	43	58,72	-2,13	46	69,36	-0,92

Влагосодержание воздуха d , г/кг; $d = f(\varphi, t)$												
$\varphi, \%$	$d_d = 80 \text{ г/кг}$			$d_d = 90 \text{ г/кг}$			$d_d = 100 \text{ г/кг}$			$d_d = 110 \text{ г/кг}$		
	t_d	(8)	$\delta, \%$	t_d	(8)	$\delta, \%$	t_d	(8)	$\delta, \%$	t_d	(8)	$\delta, \%$
20	84,5	81,56	1,95	87	90,73	0,82	89	98,74	-1,26	91,5	109,67	-0,30
30	74,7	82,19	2,74	76,7	90,15	0,17	79	100,17	0,17	81	109,70	-0,27
40	68	82,22	2,78	70	90,62	0,69	72,4	101,73	1,73	74	109,82	-0,16
50	63	81,73	2,16	65	90,36	0,40	67	99,83	-0,17	68,6	108,06	-1,76
60	59	80,74	0,93	61	89,46	-0,60	63,5	101,58	1,58	65	109,58	-0,38
70	56	80,99	1,23	58,1	90,32	0,36	60	99,63	-0,37	61,7	108,72	-1,16
80	53	79,37	-0,79	55,2	89,12	-0,98	57,5	100,53	0,53	58,4	105,36	-4,22
90	51	80,84	1,05	53	89,98	-0,02	55	100,09	0,09	56	105,54	-4,05
100	49	81,81	2,26	50,1	86,88	-3,46	52,6	99,57	-0,43	54	107,43	-2,34

Таблица 9 – Зависимость влагосодержания воздуха от энтальпии и относительной влажности

Влагосодержание воздуха $d, \text{г/кг}$; $d = f(i, \varphi)$												
$d_{\text{д}}, \text{г/кг}$ Γ	$\varphi = 5 \%$			$\varphi = 10 \%$			$\varphi = 20 \%$			$\varphi = 30 \%$		
	$i_{\text{дв}}$ кДж/кг	(9)	$\delta, \%$	$i_{\text{дв}}$ кДж/кг	(9)	$\delta, \%$	$i_{\text{дв}}$ кДж/кг	(9)	$\delta, \%$	$i_{\text{дв}}$ кДж/кг	(9)	$\delta, \%$
10	95,95	13,40	33,97	80,45	11,98	19,78	66,62	10,95	9,47	59,08	10,52	5,15
20	140,37	23,64	18,19	123,19	22,06	10,28	106,43	20,57	2,86	98,05	20,22	1,11
30	178,08	33,32	11,05	158,80	31,54	5,12	142,46	30,37	1,25	137,01	31,10	3,66
40	192,74	37,24	-6,90	174,30	35,90	10,26	164,25	36,69	8,27	158,38	37,45	6,39
50	224,58	45,96	-8,07	206,15	45,20	9,59	195,67	46,22	7,55	188,97	46,93	6,15
60				256,43	60,61	1,02	236,74	59,30	1,16	225,84	58,88	1,87
70				287,43	70,41	0,58	267,32	69,41	0,84	256,01	69,02	1,39
80							297,07	79,49	0,64	285,34	79,16	1,06
90							326,40	89,62	0,42	314,67	89,52	0,53
100							356,15	100,0	0,05	343,58	99,94	0,06
110							384,22	110,0	0,02	372,49	110,5	0,49

Влагосодержание воздуха $d, \text{г/кг}$; $d = f(i, \varphi)$												
$d_{\text{д}}, \text{г/кг}$ Γ	$\varphi = 40 \%$			$\varphi = 50 \%$			$\varphi = 60 \%$			$\varphi = 70 \%$		
	$i_{\text{дв}}$ кДж/кг	(9)	$\delta, \%$	$i_{\text{дв}}$ кДж/кг	(9)	$\delta, \%$	$i_{\text{дв}}$ кДж/кг	(9)	$\delta, \%$	$i_{\text{дв}}$ кДж/кг	(9)	$\delta, \%$
10	54,05	10,30	2,96	49,86	10,06	0,60	46,93	9,99	0,13	44,41	9,92	0,84
20	92,18	20,06	0,31	87,99	20,08	0,41	84,64	20,15	0,77	81,29	20,09	0,46
30	126,54	29,79	0,71	121,51	29,74	0,87	118,16	29,98	0,07	115,23	30,20	0,68
40	153,35	37,84	5,39	149,16	38,15	4,62	146,23	38,63	3,41	144,14	39,23	1,93
50	183,52	47,32	5,37	179,33	47,72	4,57	176,40	48,29	3,42	173,47	48,70	2,60
60	218,72	58,83	1,95	213,69	59,03	1,62	209,08	59,10	1,50	205,73	59,43	0,94
70	248,47	68,90	1,58	242,60	68,84	1,66	238,41	69,08	1,31	235,06	69,44	0,80
80	278,22	79,24	0,95	272,35	79,19	1,01	267,32	79,14	1,07	263,55	79,36	0,80
90	307,55	89,67	0,37	301,68	89,62	0,42	296,65	89,55	0,50	293,30	89,90	0,11
100	336,04	100,01	0,01	329,33	99,65	0,35	324,31	99,54	0,46	320,54	99,72	0,28
110	364,11	110,37	0,34	357,41	109,99	0,01	352,80	110,00	0,00	349,03	110,13	0,12

Влагосодержание воздуха $d, \text{г/кг}$; $d = f(i, \varphi)$									
$d, \text{г/кг}$	$\varphi = 80 \%$			$\varphi = 90 \%$			$\varphi = 100\%$		
	$i, \text{кДж/кг}$	(9)	$\delta, \%$	$i, \text{кДж/кг}$	(9)	$\delta, \%$	$i, \text{кДж/кг}$	(9)	$\delta, \%$
10	42,32	9,88	1,24	40,64	9,89	1,15	39,39	9,96	0,38
20	79,19	20,29	1,46	77,52	20,54	2,70	75,42	20,60	2,98
30	112,71	30,44	1,48	110,62	30,73	2,42	108,52	30,94	3,12
40	141,62	39,58	1,06	139,11	39,83	0,42	137,43	40,29	0,71
50	171,37	49,27	1,46	168,44	49,47	1,06	164,25	49,17	1,66
60	202,80	59,79	0,36	200,28	60,19	0,31	198,19	60,66	1,10
70	232,13	69,82	0,25	229,19	70,12	0,17	225,84	70,19	0,28
80	260,20	79,61	0,49	258,10	80,21	0,27	256,01	80,76	0,94
90	288,69	89,70	0,33	285,76	90,01	0,02	283,66	90,57	0,63
100	317,18	99,94	0,06	314,67	100,39	0,39	311,32	100,49	0,49
110	345,26	110,16	0,15	341,90	110,29	0,26	339,39	110,67	0,61

Приведем примеры вычисления параметров воздуха по разработанным формулам.

Пример 1.

Воспользуемся примером, приведенным в работе [2]. Воздух в количестве 24000 кг/ч с начальными параметрами $t_1 = 34^\circ\text{C}$, $\varphi_1 = 35 \%$, $i_1 = 65 \text{ кДж/кг}$, $d_1 = 11,7 \text{ г/кг}$ поступает в камеру для охлаждения. Определить параметры воздуха после камеры.

Посредством проведенного графоаналитического расчета в этой работе получены следующие результаты: температура $t_2 = 16,75^\circ\text{C}$ воздуха после камеры (индексы 1 и 2 относятся соответственно к параметрам воздуха до и после камеры), $i_2 = 43 \text{ кДж/кг}$, $\varphi_2 = 82 \%$ и $d_2 = 10,3 \text{ г/кг}$. Определим эти параметры по соответствующим формулам без применения $I-d$ -диаграммы и оценим относительную погрешность расчета по ним.

По формуле $\varphi = f(t, d)$, (4), находим при $16,75^\circ\text{C}$ и $d_2 = 10,3 \text{ г/кг}$ $\varphi_2 = 85 \%$, относительная погрешность $\delta = 3,6 \%$. Далее из выражения (1) получаем $i_2 = 43 \text{ кДж/кг}$, относительная погрешность $\delta = 0 \%$. Заметим, что найдя относительную влажность $\varphi_2 = 85 \%$, мы можем воспользоваться также формулой (2) для нахождения энтальпии воздуха, которая также дает значение $i_2 = 43 \text{ кДж/кг}$.

Пример 2.

Воздух в количестве 48000 кг/ч с начальными параметрами $t_1 = 28,5^\circ\text{C}$, $\varphi_1 = 40 \%$, $i_1 = 54 \text{ кДж/кг}$, $d_1 = 9,8 \text{ г/кг}$ поступает в камеру для охлаждения. Определить параметры воздуха после камеры.

Посредством аналитического расчета в примере получены значения $i_2 = 33,75 \text{ кДж/кг}$ и $t_2 = 12,54^\circ\text{C}$, после чего с помощью $I-d$ -диаграммы были найдены остальные параметры: $d_2 = 8,6 \text{ г/кг}$ и $\varphi_2 = 90 \%$.

Определим по формуле (2) методом дихотомии значение относительной влажности, которое будет равно 90,1 %, т.е. практически такое же, как и найденное по $I-d$ -диаграмме.

Далее по формуле (8) при $t_2 = 12,54^\circ\text{C}$ и $\varphi_2 = 90,1 \%$ получим $d_2 = 8,5 \text{ г/кг}$. Относительная погрешность составит 1,2 %.

Пример 3. В камере осушается и охлаждается 10800 кг/ч воздуха с начальными параметрами $t_1 = 30^\circ\text{C}$, $\varphi_1 = 50 \%$, $i_1 = 64,5 \text{ кДж/кг}$, $d_1 = 13,5 \text{ г/кг}$, $p_1 = 2,1 \text{ кПа}$. Определить параметры воздуха после камеры.

Посредством аналитического расчета в примере получены значения $p_2 = 1,346$ кПа и $t_2 = 23,3$ °С, после чего с помощью $I-d$ -диаграммы были найдены остальные параметры: $i_2 = 45$ кДж/кг $d_2 = 8,5$ г/кг и $\varphi_2 = 47$ %.

Определим по формуле (10) величину влагосодержания, подставив в нее значение $p_2 = 1,346$ кПа, которая будет равна $8,6$ г/кг, что даст относительную погрешность $1,2$ %. Далее, зная $d_2 = 8,6$ г/кг и $t_2 = 23,3$ °, по формуле (1) находим энтальпию $i_2 = 45,6$ кДж/кг, относительная погрешность составит $\delta = 1,3$ %.

Заключение

Предложенные уравнения позволяют аналитическим путем с достаточной для практических расчетов точностью определять различные параметры влажного воздуха, не пользуясь при этом id -диаграммой. Это, в свою очередь, дает возможность проводить моделирование работы различных систем подготовки воздуха в зависимости от изменяющихся его параметров, а также выполнять прогнозирование их работы. Кроме того, компьютеризация расчетов таких устройств облегчит проектную работу и сократит ее сроки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сушков В.В. Техническая термодинамика. Москва: Государственное энергетическое издательство, 1953. 336 с.
2. Баркалов Б.В, Карпис Е.Е. Кондиционирование воздуха в промышленных, общественных и жилых зданиях. Москва: Стройиздат, 1982, 312 с.

REFERENCES

1. Sushkov V.V. *Tekhnicheskayatermodinamika* [Technical thermodynamics]. Moscow: Gosudarstvennoeenergeticheskoeizdatel'stvo, 1953. 336 p.
2. Barkalov B.V, Karpis E.E. *Kondicionirovanievozduha v promyshlennyh, obshchestvennyh i zhilyhzdaniyah* [Air conditioning in industrial, public and residential buildings]. Moscow: Stroyizdat, 1982, 312 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Оленев Евгений Александрович – доктор технических наук, профессор, Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых (600000, Россия, г. Владимир, ул. Горького, 87, e-mail: oleneva@mail.ru)

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Olenev Evgeny Alexandrovich – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nikolai Grigoryevich Stoletov, (600000, Russia, Vladimir, 87 Gorky Street, e-mail: oleneva@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 07.12.2023; одобрена после рецензирования 25.12.2023, принята к публикации 12.01.2024.

The article was submitted 07.12.2023; approved after reviewing 25.12.2023; accepted for publication 12.01.2024.