

ОХРАНА ТРУДА.  
ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ.  
ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 621.51

*А. С. Галюжин, С. Д. Галюжин*

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА КОНДЕНСАТА ПРИ СЖАТИИ ВОЗДУХА  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УРАВНЕНИЙ КЛАПЕЙРОНА И ВАН-ДЕР-ВААЛЬСА**

UDC 621.51

*A. S. Galyuzhin, S. D. Galyuzhin*

**DETERMINATION OF CONDENSATE VOLUME UNDER AIR COMPRESSION  
USING THE CLAPEYRON AND VAN DER WAALS EQUATIONS**

**Аннотация**

Методика определения количества конденсата при сжатии воздуха с помощью математических уравнений Клапейрона и Ван-дер-Ваальса дает возможность с большой точностью определить объем конденсата.

**Ключевые слова:**

сжатый воздух, пневмопривод, конденсат, точка росы, уравнение Клапейрона, уравнение Ван-дер-Ваальса, объем конденсата.

**Abstract**

The method for determining the amount of condensate under air compression by using the mathematical equations of Clapeyron and Van der Waals allows the determination of condensate volume with high accuracy.

**Keywords:**

compressed air, pneumatic drive, condensate, dew point, Clapeyron equation, Van der Waals equation, condensate volume.

**Введение**

В промышленных машинах нашел широкое применение сжатый атмосферный воздух для разных систем. В атмосферном воздухе находится парообразная влага, в 1 м<sup>3</sup> атмосферного воздуха в Республике Беларусь при различных метеорологических условиях содержится

от 0,4 до 60 г парообразной воды.

При сжатии воздуха в компрессоре воздух становится пересыщенным влагой, часть влаги конденсируется на поверхностях, а часть остается в виде пара. Поэтому перед подготовкой сжатого воздуха в качестве рабочего тела в пневмоприводе необходимо максимально из него удалить влагу. При создании



устройства для осушки сжатого воздуха следует знать объем конденсата, который сконденсируется на поверхностях в пневмоприводе при сжатии воздуха.

### Объект исследований

Воздух на планете имеет воду в виде пара и называется влажным. Почти всегда в Республике Беларусь атмосферный воздух бывает *ненасыщенным*, т. е. при определенной температуре влажный воздух может пополняться молекулами воды. Однако этот процесс не происходит постоянно, в данном объеме наступает состояние *насыщения* и зависит от температуры влажного воздуха: чем ниже температура воздуха, тем меньше молекул воды может в нем раствориться. Температура влажного воздуха, при которой наступает состояние насыщения, называется *температурой точки росы*. В воздухе, охлажденном немного ниже *температуры точки росы*, находящаяся в нем парообразная вода конденсируется, в результате чего воздух становится *пересыщенным*. То есть компрессор может всасывать ненасыщенный, насыщенный и пересыщенный воздух, но большую часть года в Республике Беларусь из атмосферы всасывается ненасыщенный воздух. Основными характеристиками атмосферного воздуха являются: абсолютная и относительная влажность; газовая постоянная; влагосодержание и энтальпия; температура точки росы; плотность. Для сжатого воздуха к основным показателям относятся температура точки росы, степень осушки, а при расчетах пневмоприводов такие показатели, как подача компрессора, номинальное давление, температура воздуха и плотность сжатого воздуха [3, с. 78–79; 4, с. 38–40; 5, с. 53–64].

### Основная часть

Рассмотрим методики расчета объема конденсата (воды, находящейся в

жидком состоянии) при сжатии воздуха. Влажный воздух относится к реальным газам, описываемым уравнением Ван-дер-Ваальса, учитывающим собственный объем молекул и межмолекулярную силу притяжения [6, с. 43; 7, с. 93–96].

$$\left(p + \frac{n^2 a}{V^2}\right)(V - nb) = nRT, \quad (1)$$

где  $p$  – абсолютное давление газа, Па;  $V$  – объем газа, м<sup>3</sup>;  $T$  – абсолютная температура, К;  $R$  – молярная газовая постоянная, Дж/(моль·К);  $a$  – постоянная Ван-дер-Ваальса, характеризующая силы межмолекулярного притяжения,  $a = 0,138 \text{ Па}\cdot\text{м}^6/\text{моль}^2$  [9];  $b$  – коэффициент, определяющий объем, занимаемый молекулами,  $b = 0,3183 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{моль}$  [8];  $n$  – количество молей в объеме  $V$ , моль.

Следует отметить, что количество молей воздуха при сжатии постоянно, т. к. определение количества осуществляется при нормальных условиях.

При небольших давлениях и высоких температурах  $nb < V$  и  $n^2 a/V^2 < p$  уравнение Ван-дер-Ваальса аналогично уравнению Клапейрона, описывающему состояние идеального газа [6, с. 43–45]:

$$pV/T = \text{const}. \quad (2)$$

Поэтому во всех методиках для определения объема конденсата в сжатом воздухе применяют уравнение Клапейрона [9; 10, с. 18–26]. В [6, с. 42] также уравнение Клапейрона достаточно точно можно использовать и для атмосферного воздуха.

Проведем для сравнения анализ методик при расчете объема конденсата, образующегося при сжатии воздуха. Если сравнивать состояния влажного воздуха до сжатия компрессором и после, то уравнение Клапейрона примет вид [6, с. 41–42, с. 100]:



$$\frac{p_{атм} V_{атм}}{T_{атм}} = \frac{p_{сж} V_{сж}}{T_{сж}}, \quad (3)$$

где  $p_{атм}$ ,  $p_{сж}$  – атмосферное давление и абсолютное давление при сжатии воздуха, Па;  $V_{атм}$ ,  $V_{сж}$  – объем воздуха до и после сжатия, м<sup>3</sup>;  $T_{атм}$ ,  $T_{сж}$  – абсолютная температура атмосферного и при сжатии воздуха, К.

Объем атмосферного воздуха  $V_{атм}$ , необходимый для получения  $V_{сж}$ ,

$$V_{атм} = \frac{V_{сж} \delta_{сж}}{\delta_T}, \quad (4)$$

где  $\delta_{сж}$  – коэффициент сжатия воздуха,  $\delta_{сж} = p_{сж} / p_{атм}$ ;  $\delta_T$  – коэффициент изменения температуры воздуха,  $\delta_T = T_{сж} / T_{атм}$ .

При метеорологической оценке содержания влаги в атмосферном воздухе пользуются следующими показателями: относительная влажность и температура [11, с. 57–92, 136–142]. В прогнозах погоды систематически говорят про эти показатели. Используем данные показатели для дальнейших методик расчетов.

Масса влаги в парообразном состоянии  $m_{пв.атм}$  в объеме  $V_{атм}$  определяется как

$$m_{пв.атм} = V_{атм} \rho_{н.атм} \varphi_{атм}, \quad (5)$$

где  $\rho_{н.атм}$  – абсолютная влажность атмосферного воздуха в состоянии насыщения (максимальная абсолютная влажность при данной температуре), г/м<sup>3</sup>;  $\varphi_{атм}$  – относительная влажность атмосферного воздуха.

Масса влаги в парообразном состоянии насыщения в единице объема влажного воздуха зависит от температуры и давления до 10 МПа и минимально зависит от давления в конкретном объеме [2, с. 85–86; 9, с. 16]. При сжатии воздуха его объем уменьшается, но масса влаги остается прежней, как и

до сжатия. В результате сжатия воздух становится пересыщенным, в пневмоприводах появляется конденсат и его относительная влажность находится в состоянии насыщения, т. е.  $\varphi_{сж} = 1$ . Если при сжатии воздуха будет достигнуто состояние насыщения, но конденсат при этом не появится, то его относительная влажность  $\varphi_{сж} < 1$ .

Массу влаги в парообразном состоянии  $m_{пв.сж}$ , находящейся в сжатом воздухе, можно рассчитать с помощью зависимости (5):

$$m_{пв.сж} = V_{сж} \rho_{н.сж} \varphi_{сж}, \quad (6)$$

где  $\rho_{н.сж}$  – абсолютная влажность сжатого воздуха в состоянии насыщения, г/м<sup>3</sup>;  $\varphi_{сж}$  – относительная влажность сжатого воздуха.

Массу конденсата  $m_{вк}$  можно определить, приняв при этом  $\varphi_{сж} = 1$ :

$$m_{вк} = m_{пв.атм} - m_{пв.сж}. \quad (7)$$

В результате расчетов с помощью зависимости (7) получаем  $m_{вк} < 0$  и делаем вывод, что после сжатия воздух остался ненасыщенным, а модуль численного значения  $m_{вк}$  – масса парообразной влаги, недотягивающая до состояния насыщения сжатого воздуха. При  $m_{вк} = 0$  вследствие сжатия воздуха достигается состояние насыщения, но при этом образования конденсата не происходит. Наличие конденсата ( $m_{вк} > 0$ ) означает, что не только образовался конденсат в результате сжатия воздуха, но и сжатый воздух насыщенный.

В технической литературе по термодинамике [2, с. 128–134; 3, с. 17, 13] и в стандарте ISO 7183:2007 зависимость абсолютной влажности воздуха в состоянии насыщения от его температуры приведена в виде таблиц или в графической форме, что уменьшает точность расчетов и не дает возможности проводить их с использованием компьютерных программ. Поэтому при



помощи программы Excel были получены полиномы, позволяющие расчетным путем определять необходимые зависимости, т. е.

$$\rho_{н.атм} = a_1 t_{р.атм}^4 + a_2 t_{р.атм}^3 + a_3 t_{р.атм}^2 + a_4 t_{р.атм} + a_5; \quad (8)$$

$$t_{р.атм} = b_1 \ln(\rho_{н.атм}) - b_2, \quad (9)$$

где  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, b_1$  и  $b_2$  – коэффициенты полиномов,  $a_1 = 2 \cdot 10^{-6}$ ,  $a_2 = 2 \cdot 10^{-4}$ ,  $a_3 = 9,9 \cdot 10^{-3}$ ,  $a_4 = 0,3216$ ,  $a_5 = 4,7641$ ,  $b_1 = 16,21$ ,  $b_2 = 18,04$ ;  $t_{р.атм}$  – температура точки росы атмосферного воздуха, °С.

Уравнение (8) дает возможность получать данные для диапазона температур  $t_{р.атм}$  от  $-60$  до  $+120$  °С, если аппроксимировать использованный полином 4-го порядка с величиной достоверности, равной 0,9999. Диапазон температур для уравнения (9) такой же, а величина достоверности аппроксимации – 0,961. Для зависимости  $\rho_{н.атм} = f(t_{р.атм})$  она максимальна только при использовании логарифмической зависимости (9).

Для определения массы влаги  $m_{вк}$ , образовавшейся при сжатии в виде конденсата, применим уравнения (5)–(8). Расчет  $\rho_{н.атм}$  и  $\rho_{н.сж}$  выполним, используя уравнение (8), подставляя вместо  $t_{р.атм}$  в уравнение  $t_{атм}$  и  $t_{сж}$ . В результате уравнение (7) получится в следующем виде:

$$m_{вк} = \frac{V_{сж} \delta_{сж}}{\delta_T} \Phi_{атм} \times (a_1 t_{атм}^4 + a_2 t_{атм}^3 + a_3 t_{атм}^2 + a_4 t_{атм} + a_5) - V_{сж} \Phi_{сж} (a_1 t_{сж}^4 + a_2 t_{сж}^3 + a_3 t_{сж}^2 + a_4 t_{сж} + a_5). \quad (10)$$

Для оценки количества объема конденсата  $V_{вк}$ , который будет поступать в пневмопривод, проведены расчеты.

$$V_{вк} = \frac{m_{вк}}{\rho_в}, \quad (11)$$

где  $\rho_в$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>.

С высокой точностью для технических расчетов при давлениях до 10 МПа в диапазоне температур от 0 до 40 °С (максимальный диапазон температур конденсирования влаги) можно принять  $\rho_в = 10^3$  кг/м<sup>3</sup> [13, с. 7].

Определим использование уравнения Ван-дер-Ваальса для расчета объема конденсата  $V_{вк}$ . Запишем данное уравнение для следующих состояний воздуха: до сжатия и после него:

$$\frac{\left(p_{атм} + \frac{n^2 a}{V_{атм}^2}\right)(V_{атм} - nb)}{n T_{атм}} = \frac{\left(p_{сж} + \frac{n^2 a}{V_{сж}^2}\right)(V_{сж} - nb)}{n T_{сж}}. \quad (12)$$

С учетом того, что  $\delta_{сж} = p_{сж} / p_{атм}$ , а  $\delta_T = T_{сж} / T_{атм}$ , имеем

$$\left(p_{атм} + \frac{n^2 a}{V_{атм}^2}\right)(V_{атм} - nb) = \frac{\left(p_{атм} \delta_{сж} + \frac{n^2 a}{V_{сж}^2}\right)(V_{сж} - nb)}{\delta_T}. \quad (13)$$

Для расчета объема конденсата  $V_{вк}$  надо из уравнения (13) получить зависимость  $V_{атм} = f(p_{атм}, V_{сж}, T_{атм}, T_{сж}, n, a, b)$ . Решить данное уравнение относительно  $V_{атм}$  в явном виде невозможно, а значит, решать задачу необходимо методом последовательных приближений, что скажется на точности вычислений.

Проанализируем уравнение (13). Предположим, что силы межмолекулярного притяжения равны нулю, и учтем объем, занимаемый молекулами. В результате уравнение (13) получит вид:



$$p_{атм}(V_{атм} - nb) = \frac{p_{атм} \delta_{сж}(V_{сж} - nb)}{\delta_T},$$

или

$$V_{атм} = \frac{\delta_{сж} V_{сж}}{\delta_T} - nb(\delta_{сж} - \delta_T). \quad (14)$$

Проанализируем уравнения (4) и (14). Расчет с помощью уравнения Клапейрона показывает необходимость наличия большого количества атмосферного воздуха для получения одинакового объема сжатого воздуха, чем расчет с помощью уравнения Ван-дер-Ваальса.

При  $t_{атм} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $T_{атм} = 303,15 \text{ К}$ ),  $\Delta T = T_{сж} - T_{атм} = 4 \text{ К}$  и  $\delta_{сж} = 9$  объём атмосферного воздуха рассчитаем с помощью уравнений Клапейрона ( $V_{атм.кл}$ ) и Ван-дер-Ваальса ( $V_{атм.вв}$ ):  $V_{атм.кл} = 8,88 \text{ м}^3$ ,  $V_{атм.вв} = 8,78 \text{ м}^3$ . Разница составляет всего 1,2 %. При этом определение количества молей  $n$  выполнялось путем приведения объема атмосферного воздуха к нормальным условиям  $V_{атм.н}$  ( $p_{атм.н} = 101325 \text{ Па}$ ,  $T_{атм} = 273,15 \text{ К}$ ) с помощью уравнения Клапейрона и с учетом того, что для реального воздуха объём одного моля  $V_m = 22,4 \text{ дм}^3$  [14, с. 542]. При определении количества молей  $n$  использовалась зависимость  $n = V_{атм.н}/V_m$ , а при тех же условиях, но  $\Delta T = 20 \text{ К}$ , разница  $V_{атм.кл}$  и  $V_{атм.вв}$  составляет меньше 1 %.

При уменьшении  $t_{атм}$  разница  $V_{атм.кл}$  и  $V_{атм.вв}$  также несущественно уменьшается. При  $t_{атм} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $T_{атм} = 293,15 \text{ К}$ ),  $\Delta T = 4 \text{ К}$  и  $\delta_{сж} = 9$  разница составляет уже 1,07 %, а при  $\Delta T = 20 \text{ К}$  – 1,12 %. При дальнейшем уменьшении  $t_{атм}$  разница  $V_{атм.кл}$  и  $V_{атм.вв}$  значительно не изменяется. Для  $t_{атм} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $T_{атм} = 273,15 \text{ К}$ ),  $\Delta T = 4 \text{ К}$  и  $\Delta T = 20 \text{ К}$  разница  $V_{атм.кл}$  и  $V_{атм.вв}$  не более 1,1 %.

Проанализируем уравнение (13) дальше. Допустим, что объём, занимае-

мый молекулами, равен нулю, но учтем только силы межмолекулярного притяжения. В этом случае уравнение (13) будет иметь следующий вид:

$$\left( p_{атм} + \frac{n^2 a}{V_{атм}^2} \right) V_{атм} = \frac{\left( p_{атм} \delta_{сж} + \frac{n^2 a}{V_{сж}^2} \right) V_{сж}}{\delta_T}. \quad (15)$$

Решить уравнение (15) относительно  $V_{атм}$  в явном виде нельзя, поэтому проведем анализ влияния слагаемого  $n^2 a / V_{атм}^2$ . Так, при  $t_{атм} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $T_{атм} = 303,15 \text{ К}$ ),  $\delta_{сж} = 9$ ,  $\Delta T = 4 \text{ К}$  и  $\Delta T = 20 \text{ К}$  слагаемое  $n^2 a / V_{атм}^2$  не более 240 Па. В этом случае  $p_{атм} + n^2 a / V_{атм}^2$  возрастает на 0,21 % по сравнению с  $p_{атм}$  (принималось среднее значение  $V_{атм} = 9 \text{ м}^3$ ). То есть влияние  $n^2 a / V_{атм}^2$  на разницу  $V_{атм.кл}$  и  $V_{атм.вв}$  крайне мало.

Также уравнение (13) решено относительно  $V_{атм}$  методом последовательного приближения с точностью 1 % с использованием программы Mathcad. Результаты, рассчитанные с помощью уравнений Клапейрона ( $V_{атм.кл}$ ) и Ван-дер-Ваальса ( $V_{атм.вв}$ ) при  $t_{атм} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $V_{сж} = 1 \text{ м}^3$  и  $\delta_{сж} = 9$ , приведены в табл. 1.

Проведенный анализ показал, что при выполнении инженерных расчетов массы конденсата  $m_{вк}$  при сжатии атмосферного воздуха для повышения точности данных расчетов в уравнение (10) необходимо ввести коэффициент  $k_{вв}$ , учитывающий собственный объём молекул и силу притяжения между молекулами.

$$m_{вк} = \frac{V_{сж} \delta_{сж}}{k_{вв} \delta_T} \varphi_{атм} (a_1 t_{атм}^4 + a_2 t_{атм}^3 + a_3 t_{атм}^2 + a_4 t_{атм} + a_5) - V_{сж} \varphi_{сж} (a_1 t_{сж}^4 +$$



$$+ a_2 t_{сж}^3 + a_3 t_{сж}^2 + a_4 t_{сж} + a_5). \quad (16)$$

Усредненное значение коэффициента можно считать  $k_{\text{вв}} = 1,011 \dots 1,012$ .

Для определения зависимости объема конденсата от степени сжатия  $\delta_{сж}$ , относительной влажности  $\varphi_{\text{атм}}$ , температуры атмосферного воздуха  $T_{\text{атм}}$  и разности температур атмосферного и

сжатого воздуха  $\Delta T$  с помощью уравнений (16) и (11) выполнены расчеты, которые осуществлялись с использованием программы Mathcad.

На рис. 1 приведена зависимость объема конденсата  $V_{\text{вк}} = f_1(\Delta T)$  для  $1 \text{ м}^3$  сжатого воздуха при различных  $T_{\text{атм}}$ : разность температур  $\Delta T = T_{сж} - T_{\text{атм}}$ .

Табл.1. Результаты расчетов необходимых объемов атмосферного воздуха с помощью уравнений Клапейрона и Ван-дер-Ваальса для получения  $1 \text{ м}^3$  сжатого воздуха при абсолютном давлении  $0,9 \text{ МПа}$

$\Delta T, \text{ К}$	$\delta_T$	$V_{\text{атм.кл}}, \text{ м}^3$	$n, \text{ моль}$	$V_{\text{атм.кл}}, \text{ м}^3$	$V_{\text{атм.вв}}, \text{ м}^3$	Разница $V_{\text{атм.кл}}$ и $V_{\text{атм.вв}}, \%$
4	1,013	8,004	357,32	8,88	8,79	1,12
8	1,026	7,896	352,68	8,77	8,67	1,11
12	1,040	7,801	348,26	8,65	8,55	1,11
16	1,053	7,702	343,84	8,55	8,45	1,11
20	1,066	7,610	339,73	8,44	8,34	1,11

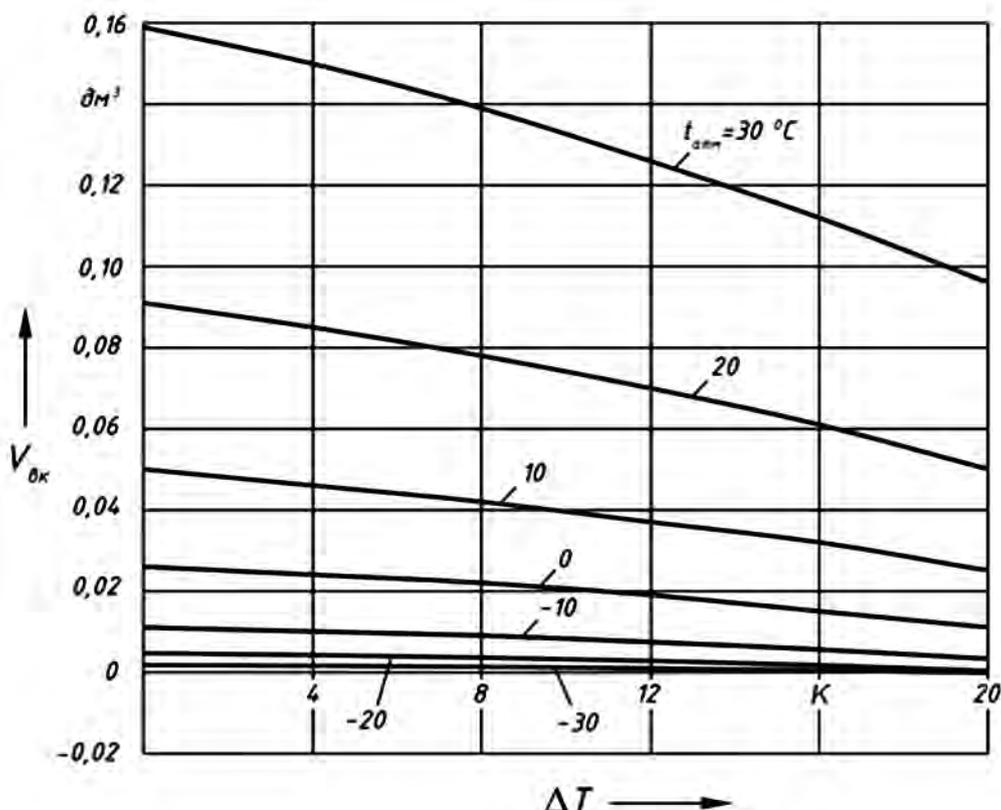


Рис. 1. Зависимость объема конденсата  $V_{\text{вк}}$  в  $1 \text{ м}^3$  сжатого воздуха от разности температур сжатого и атмосферного воздуха  $\Delta T$  при различных значениях  $T_{\text{атм}}$  и  $\varphi_{сж} = 1, \delta_{сж} = 9, \varphi_{\text{атм}} = 0,7$

Охрана труда. Охрана окружающей среды.  
Геоэкология



У сжатого воздуха температура повышается в соответствии с происходящим в компрессоре процессом [15, с. 209–216]. При поступлении сжатого воздуха в пневмосистему он охлаждается из-за теплообмена с окружающей средой. Поэтому и расчеты выполнены для различных значений  $\Delta T$ .

Рассмотрим работу пневмосистемы предприятия в теплый день ( $t_{атм} = 24\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\varphi_{атм} = 0,7$ ), характерный для Беларуси летом. Примем следующее: подача компрессора равна  $270\text{ м}^3/\text{ч}$ , рабочее избыточное давление  $0,8\text{ МПа}$ , температура сжатого воздуха  $32\text{ }^\circ\text{C}$ . При таких условиях  $\rho_{н.атм} = 21,578\text{ г/м}^3$ ,  $\rho_{н.сж} = 33,490\text{ г/м}^3$ ,  $p_{сж} = 0,9\text{ МПа}$ ,  $p_{атм} = 0,1\text{ МПа}$ ,  $\delta_{сж} = 9$ ,  $\delta_T = 1,027$ ,  $\varphi_{сж} = 1$  (принимая, что в результате сжатия наступило состояние насыщения). При расчетах по вышеприведенной методике получим, что за 1 ч работы  $m_в = 26,7\text{ кг}$ , т. е. компрессор вместе со сжатым воздухом будет подавать в пневмосистему почти 27 л конденсата в жидком состоянии. При температуре атмосферного воздуха выше  $0\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\varphi_{атм} = 0,7$  и  $\Delta T = 20\text{ К}$  компрессор за 1 ч работы будет подавать в пневмосистему 3,1 л. Если температура атмосферного воздуха затем станет ниже  $0\text{ }^\circ\text{C}$ , то конденсат замерзнет, а пневмопривод будет коррозировать. Некоторые компрессоры имеют меньшую подачу, например, компрессор ЭК 4В-М, подача которого равна  $0,4\text{ м}^3/\text{ч}$ , рабочее избыточное давление  $0,8\text{ МПа}$ . Оценив работу данного компрессора при температуре атмосферного воздуха  $3\text{ }^\circ\text{C}$  и относительной влажности  $80\%$ , т. е. при погоде в начале зимнего периода, при проведении экспериментальных исследований температура сжатого воздуха на выходе равна  $14\text{ }^\circ\text{C}$ . В результате получим, что за каждый час работы в пневмосистему поступит  $11,7\text{ г}$  воды, а за 8-часовую смену –  $0,1\text{ л}$ . Если температура атмосферного воздуха будет падать ниже  $0\text{ }^\circ\text{C}$ , то в элементах пнев-

мопривода, находящихся на открытом воздухе, будет происходить образование льда и, как следствие, отказ пневмопривода.

Анализ графиков на рис. 1 показывает, что при  $\delta_{сж} = 9$ ,  $t_{атм} = -30\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\varphi_{атм} = 0,7$  и  $\Delta T > 16\text{ К}$  конденсат не образуется (кривая зависимости  $V_{вк} = f_1(\Delta T)$ , т. к. лежит ниже оси абсцисс). Причиной является низкое содержание парообразной влаги в атмосферном воздухе при температуре ниже  $0\text{ }^\circ\text{C}$ . Также следует отметить, что количество конденсата, образующегося при сжатии воздуха, существенно зависит от  $t_{атм}$  в области  $t_{атм} > -10\text{ }^\circ\text{C}$ . При отрицательных температурах атмосферного воздуха  $V_{вк}$  мало зависит от  $\Delta T$ , а с ростом  $t_{атм}$  зависимость  $V_{вк}$  от  $\Delta T$  увеличивается. Так, при  $t_{атм} = 30\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T = 0\text{ К}$   $V_{вк} = 0,158\text{ дм}^3$ , при  $\Delta T = 20\text{ К}$   $V_{вк} = 0,107\text{ дм}^3$ .

Для анализа влияния  $\varphi_{атм}$  на  $V_{вк}$  получены графики зависимости  $V_{вк} = f_2(\varphi_{атм})$  при значениях  $t_{атм}$  от  $30$  до  $-30\text{ }^\circ\text{C}$  и  $\delta_{сж} = 9$  (рис. 2).

При  $\varphi_{атм} < 0,4$  и  $t_{атм} < 10\text{ }^\circ\text{C}$  конденсат не образуется, что связано с невысоким содержанием водяных паров в атмосферном воздухе. При диапазоне температур  $t_{атм} < 0\text{ }^\circ\text{C}$  влияние  $\varphi_{атм}$  на объем конденсата в сжатом воздухе  $V_{вк}$  мало, но с ростом  $t_{атм}$  выше  $0\text{ }^\circ\text{C}$  данное влияние становится значительным. Например, при  $t_{атм} = 30\text{ }^\circ\text{C}$  и  $\varphi_{атм} \approx 0,32$  конденсат с сжатым воздухом отсутствует, а при таком же значении  $t_{атм}$  и  $\varphi_{атм} = 1$  (состояние насыщения) он достигает  $0,17\text{ дм}^3$  из  $1\text{ м}^3$  сжатого воздуха.

Также рассчитаны зависимости  $V_{вк} = f_3(\delta_{сж})$  при различных температурах атмосферного воздуха  $t_{атм}$  от  $30$  до  $-30\text{ }^\circ\text{C}$  при  $\varphi_{атм} = 0,7$  и  $\Delta T = 20\text{ }^\circ\text{C}$ . Они приведены на рис. 3. Влияние коэффициента сжатия атмосферного воздуха  $\delta_{сж}$  на объем конденсата в сжатом воздухе начинает быть существенным при положительных  $t_{атм}$ . При  $t_{атм} < -10\text{ }^\circ\text{C}$  такое влияние отсутствует.



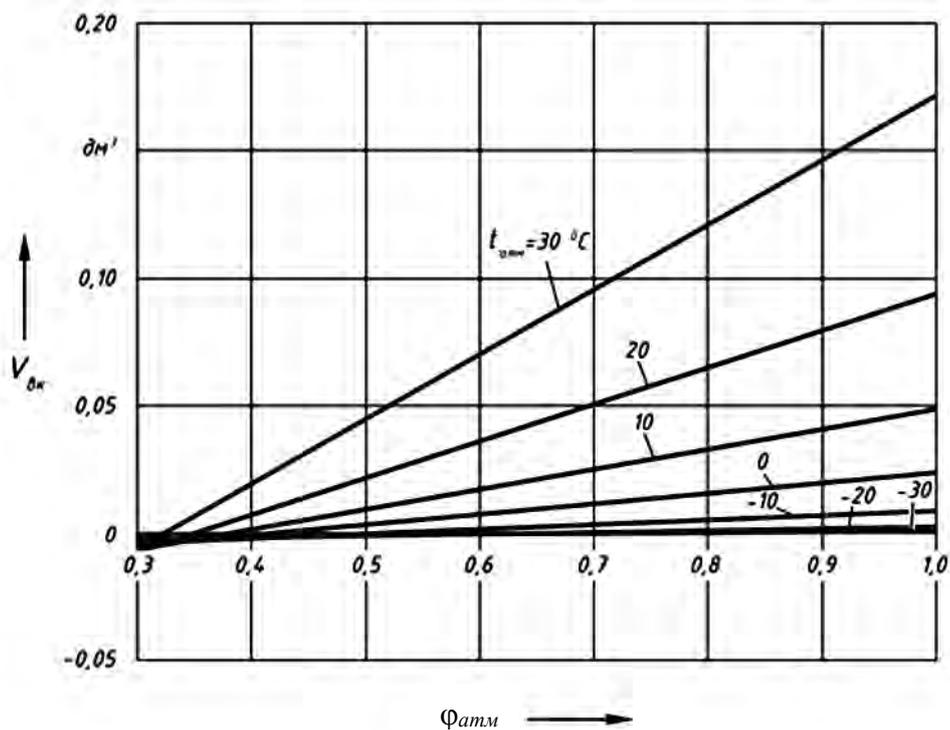


Рис. 2. Зависимость объема конденсата  $V_{\delta к}$  в  $1 \text{ м}^3$  сжатого воздуха от относительной влажности атмосферного воздуха  $\phi_{атм}$  при различных значениях  $T_{атм}$  и  $\phi_{сж} = 1$ ,  $\delta_{сж} = 9$ ,  $\Delta T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

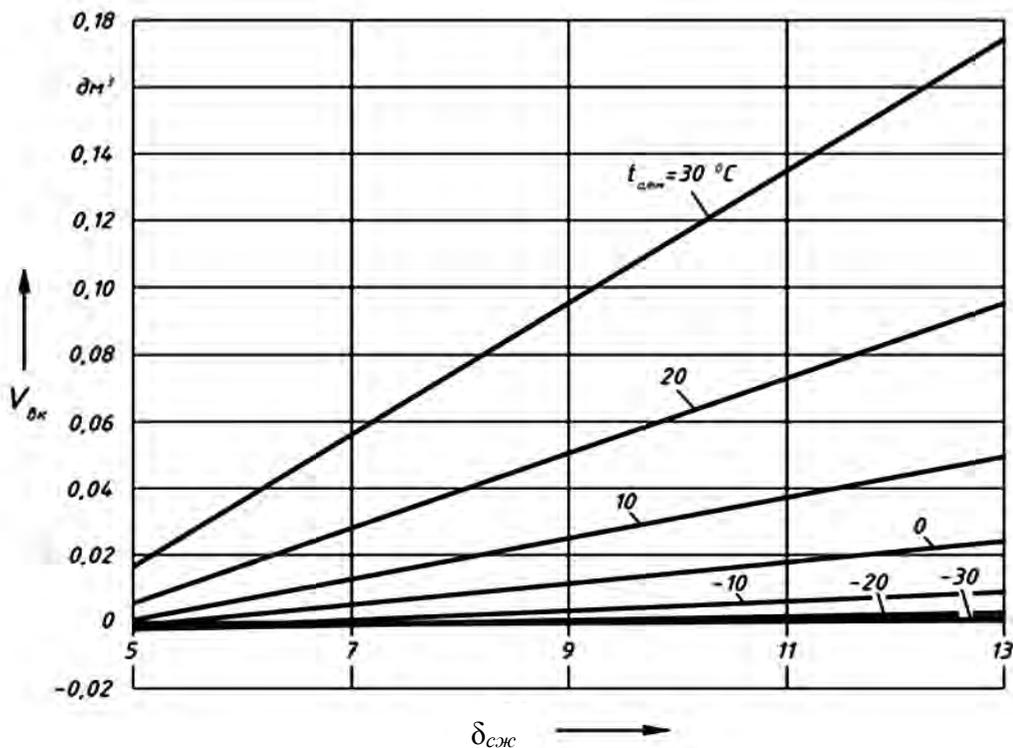


Рис. 3. Зависимость объема конденсата  $V_{\delta к}$  в  $1 \text{ м}^3$  сжатого воздуха от степени сжатия  $\delta_{сж}$  атмосферного воздуха при различных значениях  $T_{атм}$  и  $\phi_{сж} = 1$ ,  $\Delta T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\phi_{атм} = 0,7$



Значит, влияние на объем конденсата при сжатии воздуха  $V_{вк}$  оказывают температура атмосферного воздуха  $t_{атм}$ , относительная влажность атмосферного воздуха  $\varphi_{атм}$  и коэффициент сжатия  $\delta_{сж}$ .

При увеличении  $t_{атм}$ ,  $\varphi_{атм}$  и  $\delta_{сж}$  наблюдается рост объема конденсата  $V_{вк}$ . Разность температур  $\Delta T$  оказывает несколько меньшее влияние на величину  $V_{вк}$ , однако с резким увеличением  $\Delta T$  происходит резкое уменьшение  $V_{вк}$ .

При проектировании различных систем для влагоотделения необходимо учитывать, что в сжатом воздухе на выходе из компрессора практически всегда будет присутствовать вода в жидком (конденсат), а также парообразном состоянии и сжатый воздух будет насыщенным. Объем конденсата в сжатом воздухе зависит от температуры, относительной влажности атмосферного воздуха и степени его сжатия.

### Выводы

При проведении инженерных расчетов по определению объема конден-

сата, получаемого при сжатии атмосферного воздуха до 1 МПа, можно использовать уравнение (16), выведенное на основе уравнения Клапейрона с поправочным коэффициентом  $k_{вв}$ , учитывающим собственный объем молекул и силу притяжения между молекулами. Среднее значение данного коэффициента принимается  $k_{вв} = 1,0115$ .

При сжатии атмосферного воздуха с температурой  $> -10$  °С до избыточного давления  $> 0,4$  МПа в нем будет всегда образовываться конденсат (вода в жидком состоянии). Объем конденсата при сжатии атмосферного воздуха зависит от температуры, относительной влажности атмосферного воздуха и степени сжатия. При увеличении данных показателей возрастает объем конденсата. Разность температур сжатого и атмосферного воздуха минимально влияет на объем конденсата и при увеличении разности температур происходит уменьшение объема конденсата.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сжатый воздух и компрессоры – компендиум [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.immertech.ru/support/compendium/index>. – Дата доступа: 10.11.2017.
2. **Бурцев, С. И.** Влажный воздух. Состав и свойства : учебное пособие / С. И. Бурцев, Ю. Н. Цветков. – Санкт-Петербург : СПбГАХПТ, 1998. – 146 с.
3. **Бальян, С. В.** Техническая термодинамика и тепловые двигатели / С. В. Бальян. – Москва : Машиностроение, 1973. – 304 с.
4. **Метлюк, Н. Ф.** Динамика пневматических и гидравлических приводов автомобилей / Н. Ф. Метлюк, В. П. Автушко. – Москва : Машиностроение, 1980. – 231 с.
5. **Богдан, Н. В.** Гидропневмоавтоматика и гидропривод мобильных машин. Пневматические и гидравлические системы : учебное пособие / Н. В. Богдан. – Минск : Ураджай, 2002. – 426 с.
6. **Богословский, С. В.** Физические свойства газов и жидкостей : учебное пособие / С. В. Богословский. – Санкт-Петербург : СПбГУАП, 2001. – 73 с.
7. **Трофимова, Т. Н.** Курс физики : учебник для студентов вузов / Т. Н. Трофимова. – Москва : Высшая школа, 1985. – 432 с.
8. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Химический факультет МГУ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.chem.msu.ru/rus/teaching/realgases/chap1%283%29.html>. – Дата доступа: 18.11.2017.
9. Сжатый воздух и компрессоры – компендиум [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.immertech.ru/support/compendium/index>. – Дата доступа: 10.11.2009.
10. **Кравец, Ф. К.** Обоснование параметров питающей части при работе пневматического тормозного привода большегрузных автомобилей и автопоездов в циклическом режиме : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.03 / Ф. К. Кравец. – Минск, 1994. – 278 л.



11. Климат Беларуси / Под ред. В. Ф. Логинова. – Минск : ИГН НАН РБ, 1996. – 235 с.
12. **Войтехович, В. Н.** Системы сжатого воздуха промышленных предприятий. Проблемы и решения / В. Н. Войтехович // Энергоэффективность. – 2001. – № 3. – С. 16–17.
13. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам / Я. М. Вильнер [и др.] ; под общ. ред. Б. Б. Некрасова. – Минск : Высшая школа, 1985. – 382 с.
14. **Гороновский, И. Т.** Краткий справочник по химии / И. Т. Гороновский. – 5-е изд., перераб. и доп. – Киев : Наукова думка. – 831 с.
15. **Луканин, В. Н.** Теплотехника : учебник для вузов / В. Н. Луканин, М. Г. Шатров, Г. М. Камфер ; под ред. В. Н. Луканина. – Москва : Высшая школа, 2000. – 671 с.

*Статья сдана в редакцию 15 октября 2018 года*

**Александр Сергеевич Галюжин**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.  
Тел.: 375-222-22-24-50.

**Сергей Данилович Галюжин**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.

**Aleksandr Sergeyeovich Galyuzhin**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.  
Phone: 375-222-22-24-50.

**Sergei Danilovich Galyuzhin**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.

