

## МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ГУСТИНИ ПАРІВ ВОДИ У ПРИРОДНОМУ ГАЗІ ПРИ ВІД'ЄМНИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

© Крук І. С., Курило Я. В., Крук О. І., 2001  
Газопромислове управління "Львівгазвидобування"

**Розроблена методика визначення густини парів води у вологому природному газі при від'ємних температурах через парціальні тиски насичених парів води у газі в рівноважному стані з водою.**

Природний газ при його видобуванні містить крапельну рідину і такий потік природного газу є двофазним. Цей природний газ піддають технологічній очистці та підготовці до транспортування магістральними газопроводами. Тоді цей природний газ вже є однофазним, який насичений парами води.

Про вміст парів води можна судити за значенням відносної чи абсолютної вологості. Природний газ є вологим, якщо значення відносної вологості  $\varphi$  при стандартних умовах вимірювання знаходиться в межах (в частках одиниці)  $0,1 \leq \varphi \leq 1,0$ .

При вимірюванні витрати та визначенні кількості вологого природного газу необхідно розраховувати його густину.

У загальному випадку густина вологого природного газу  $\rho_{ВГ}$  визначається як сума густин сухої частини газу  $\rho_{СГ}$  і парів води  $\rho_{ПВ}$ , що містяться в газі при відповідних їх парціальних тисках  $P_{СГ}$  і  $P_{ВП}$  та температурі  $T$  газу, тобто

$$\rho_{ВГ} = \rho_{СГ} + \rho_{ПВ}, \quad (1)$$

де  $\rho_{СГ}$  і  $\rho_{ПВ}$  – відповідно густини сухого газу та парів води.

Густину сухої частини вологого природного газу розраховують за формулою

$$\rho_{СГ} = \rho_{С} \cdot \frac{P_{СГ}}{P_{С}} \cdot \frac{T_{С}}{T} \cdot \frac{1}{K}, \quad (2)$$

де  $\rho_{С}$  – густина природного газу при стандартних умовах вимірювання при абсолютній температурі  $T_{С}=293,15$  К ( $t=20$  °С) і абсолютному тиску газу  $P_{С}=101,325$  кПа;  $K$  – коефіцієнт стискуваності природного газу при абсолютному тиску  $P$  і температурі  $T$ , який визначається за рівнянням

$$K = Z / Z_{С}, \quad (3)$$

де  $Z$  і  $Z_{С}$  – фактори стискуваності природного газу при робочих і стандартних умовах вимірювання відповідно.

Парціальний тиск сухого природного газу визначають за формулою

$$P_{СГ} = P - \varphi \cdot P_{МАХ НП}, \quad (4)$$

де  $P_{МАХ НП}$  – максимальний парціальний тиск парів води при температурі  $T$ .

Підставивши (3) і (4) в (2), одержимо, що

$$\rho_{СГ} = \rho_{С} \cdot \frac{P - \varphi \cdot P_{МАХ НП}}{P_{С}} \cdot \frac{T_{С}}{T} \cdot \frac{Z_{С}}{Z}. \quad (5)$$

У стані насичення природного газу парами води, тобто при  $\varphi=1$ , формула (5) буде такою:

$$\rho_{СГ} = \rho_{С} \cdot \frac{P - P_{МАХ НП}}{P_{С}} \cdot \frac{T_{С}}{T} \cdot \frac{Z_{С}}{Z}. \quad (6)$$

Якщо виміряна температура природного газу  $T$  не перевищує температури насичення парами води  $T_{НАС}$  вологого природного газу ( $T < T_{НАС}$ ), що відповідає абсолютному тиску  $P$ , то значення  $P_{МАХ НП}=P_{НП}$ . Тиски  $P_{НП}$  у залежності від абсолютної температури  $T$  газу при додатних її значеннях визначають за даними додатку 6 із [1] або за апроксимуючими залежностями [2].

За аналогією до густини сухого природного газу густину парів води  $\rho_{ПВ}$  визначають за таким рівнянням:

$$\rho_{ПВ} = \rho_{С ПВ} \cdot \frac{P_{ПВ}}{P_{С}} \cdot \frac{T_{С}}{T} \cdot \frac{1}{K_{ПВ}}, \quad (7)$$

де  $\rho_{С ПВ}$  – густина парів води при абсолютному тиску  $P_{С}$  і абсолютній температурі  $T_{С}$ ;  $K_{ПВ}$  – коефіцієнт стискуваності парів води при температурі  $T$  і тиску  $P_{ПВ}$ .

Коефіцієнт стискуваності парів води  $K_{ПВ}$  визначають за відношенням

$$K_{ПВ} = Z_{ПВ} / Z_{С ПВ}, \quad (8)$$

де  $Z_{ПВ}$  і  $Z_{С ПВ}$  – фактори стискуваності парів води при робочих і стандартних умовах вимірювання відповідно.

Рівняння (7) можна представити у вигляді

$$\rho_{ПВ} = \varphi \cdot \rho_{МАХ НП}, \quad (9)$$

де  $\rho_{МАХ НП}$  – максимальне значення густини парів води у газі при температурі  $T$ .

Якщо виміряна температура природного газу  $T$  не перевищує температури насичення парами води  $T_{НАС}$  вологого природного газу ( $T < T_{НАС}$ ), що відповідає абсолютному тиску  $P$ , то значення  $\rho_{МАХ НП}=\rho_{НП}$ . Значення  $\rho_{НП}$  у залежності від абсолютної температури  $T$  газу визначають за даними додатку 6 із [1] або за апроксимуючими залежностями [2].

Значення  $\rho_{НП}$  і  $P_{НП}$  у залежності від абсолютної температури  $T$  газу згідно з [1] визначаються лише для додатних значень цієї температури.

Розглянемо методику визначення густини парів води при від'ємних температурах газу.

При від'ємних температурах газу пари води знаходяться у динамічній рівновазі з переохолодженою чистою водою або льодом (інеєм). Тому є очевидним, що відносну вологість  $\varphi$  можна визначити по відношенню до парціального тиску насичених парів води у газі в рівноважному стані з водою ( $P_{ПВ}$ ) або льоду ( $P_{ПЛ}$ ). При однакових температурах парціальний тиск парів води є більший за парціальний тиск парів льоду.

Різницю між парціальними тисками  $P_{ПВ}$  і  $P_{ПЛ}$  при однакових від'ємних температурах необхідно враховувати у визначенні температури точки роси  $t_p$ : точки роси по воді  $t_{PB}$  або точки роси по льоду чи

інею  $t_{PL}$ . Для одного і того ж газу завжди справедлива умова  $t_{PB} < t_{PL}$ .

Температура точки роси – це температура, до якої необхідно охолодити ненасичений газ в атмосфері вологого газу при постійному тиску, щоб довести газ до стану насичення.

Знаючи температуру точки роси і температуру газу, можна визначити значення відносної вологості  $\varphi$  таким чином:

$$\varphi = P_{t_p} / P_T, \quad (10)$$

де  $P_{t_p}$  і  $P_T$  - парціальні тиски насичених парів води в газі при температурах  $t_p$  і  $T$  відповідно.

Числові значення тиску парів води  $P_{ПВ}$  при температурі  $T$ , які отримані із різних літературних джерел і можуть використовуватися для вказаних вище цілей, наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Парціальні тиски насичених парів води  $P_{ПВ}$  і льоду  $P_{ПЛ}$  у газі.

$t, ^\circ\text{C}$	Тиск $P_{ПВ}$ , Па				Тиск $P_{ПЛ}$ , Па	
	[3]	[4]	[5]	[1]	[3]	[4]
1	2	3	4	5	6	7
-100	$3,622 \cdot 10^{-3}$	—	—	—	$1,402 \cdot 10^{-3}$	—
-90	$2,298 \cdot 10^{-2}$	—	—	—	$9,670 \cdot 10^{-3}$	—
-80	$1,190 \cdot 10^{-1}$	—	—	—	$5,472 \cdot 10^{-2}$	—
-70	$5,187 \cdot 10^{-1}$	—	—	—	$2,615 \cdot 10^{-1}$	—
-60	1,95	—	—	—	1,08	1,07
-50	6,44	6,40	—	—	3,94	3,87
-40	19,03	18,93	—	—	12,84	12,13
-30	51,03	50,66	—	—	38,00	37,33
-25	—	—	62,66	—	—	—
-20	125,59	125,32	102,66	—	103,24	102,66
-15	—	—	165,32	—	—	—
-10	286,52	286,64	259,98	—	259,89	259,98
-5	—	—	401,30	—	—	—
0	611,20	610,61	610,61	610,76	611,20	610,61
0,01	611,70	—	—	—	611,70	—
5	—	—	866,59	871,81	—	—
10	1228,10	1227,90	1226,56	1227,11	—	—
15	—	—	1706,52	1704,00	—	—
20	2339,20	2337,13	2333,13	2336,92	—	—
25	—	—	3173,08	3166,57	—	—
30	4247,00	4243,64	4239,64	4241,38	—	—
35	—	—	5626,19	5622,15	—	—
40	7385,30	7378,04	7372,71	7374,60	—	—
45	—	—	9585,85	9582,08	—	—
50	12353,0	12340,28	12332,28	12334,80	—	—
55	—	—	15732,00	15740,65	—	—
60	19948,0	19926,31	19918,31	19917,31	—	—
65	—	—	24997,87	25006,96	—	—
70	31202,0	—	31157,35	31155,73	—	—
75	—	—	38543,39	38549,94	—	—
80	47416,0	—	47342,64	47356,31	—	—
85	—	—	57808,42	57800,39	—	—
90	70182,0	—	70100,71	70107,74	—	—
95	—	—	84512,81	84523,52	—	—
100	101419,0	—	101324,72	101322,31	—	—

Для розрахунку густини парів води у діапазоні змін температур від 0 °С до – 100 °С використаємо формулу (7).

Значення густини  $\rho_{C ПВ}$  визначаємо за методикою [6]

$$\rho_{C ПВ} = \rho_{C ід} / Z_{C ПВ}, \quad (11)$$

де  $\rho_{C ід}$  і  $Z_{C ПВ}$  - густина і фактор стискуваності насичених парів води як ідеального газу при стандартних умовах вимірювання.

Густину  $\rho_{C ід}$  можна розрахувати за формулою

$$\rho_{C ід} = P_C M_{ПВ} / RT_C, \quad (12)$$

де  $R$  – універсальна газова стала ( $R=0,00831451$  МПа·м<sup>3</sup>/кмоль·К);  $M_{ПВ}$  – молярна маса насичених парів води як газу, значення якої дорівнює  $M_{ПВ}=18,0153$  кг/кмоль.

Фактор стискуваності  $Z_{C ПВ}$  визначають за формулою

$$Z_{C ПВ} = 1 - \sqrt{b_{ПВ}}, \quad (13)$$

в якій для вологих парів води  $\sqrt{b_{ПВ}} = 0,2191$  [4].

Після підстановки відповідних числових значень у (12), (13) і (11) та простих обчислень, одержимо такі результати:

$$\rho_{C ід} = 0,7489 \text{ кг/м}^3; Z_{C ПВ} = 0,95199; \rho_{C ПВ} = 0,7867 \text{ кг/м}^3.$$

Оскільки тиск насичених парів води  $P_{Н ПВ}$  для температур від 0 °С до – 60 °С є незначним (див. табл. 1), то можна прийняти, що значення  $Z_{ПВ} = 1$ . Тоді коефіцієнт стискуваності  $K_{ПВ} = 1,0504$ , а формула для визначення густини парів води  $\rho_{Н ПВ}$  матиме такий вигляд

$$\rho_{Н ПВ} = A_1 \frac{P_{Н ПВ}}{T}, \quad (14)$$

де

$$A_1 = \rho_{C ПВ} \frac{T_C}{P_C} \frac{1}{K_{ПВ}}. \quad (15)$$

Після проведених простих перетворень формула (14) буде мати такий вигляд

$$\rho_{Н ПВ} = 2,1668 \cdot 10^{-3} \frac{P_{Н ПВ}}{T}. \quad (16)$$

Числові значення густин  $\rho_{Н ПВ}$ , що розраховані

за запропонованою вище методикою, подані в табл. 2, де в колонках 2, 3 і 4 наведені результати розрахунку нами густини насичених парів води при від'ємних температурах газу для всіх тисків, які вказані в колонках 2, 3 і 4 табл. 1.

Таблиця 2 – Значення густин насичених парів води при від'ємних температурах газу.

t, °С	Густина $\rho_{Н ПВ}$ , кг/м <sup>3</sup>		
	2	3	4
- 100	$4,54 \cdot 10^{-8}$	—	—
- 90	$2,72 \cdot 10^{-7}$	—	—
- 80	$1,33 \cdot 10^{-6}$	—	—
- 70	$5,53 \cdot 10^{-6}$	—	—
- 60	$1,98 \cdot 10^{-5}$	—	—
- 50	$6,25 \cdot 10^{-5}$	$6,21 \cdot 10^{-5}$	—
- 40	$1,77 \cdot 10^{-4}$	$1,76 \cdot 10^{-4}$	—
- 30	$4,55 \cdot 10^{-4}$	$4,52 \cdot 10^{-4}$	—
- 25	—	—	$0,5472 \cdot 10^{-3}$
- 20	$1,075 \cdot 10^{-3}$	$1,073 \cdot 10^{-3}$	$0,8787 \cdot 10^{-3}$
- 15	—	—	$1,388 \cdot 10^{-3}$
- 10	$2,359 \cdot 10^{-3}$	$2,360 \cdot 10^{-3}$	$2,141 \cdot 10^{-3}$
- 5	—	—	$3,243 \cdot 10^{-3}$
0	$4,848 \cdot 10^{-3}$	$4,848 \cdot 10^{-3}$	$4,843 \cdot 10^{-3}$

1. РД 50-213-80. Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами. – М.: Изд-во стандартов, 1982.  
 2. Лесовой Л. В., Крук И. С. Аналитические зависимости для определения давления и плотности насыщенного водяного пара // Вестник Львов. политехн. ин-та. - 1984. - № 184. Теплоэнергетические и электромеханические системы. - С. 75-76.  
 3. Каталог E+E Elektronik® Ges. m.b.H., Edition 2001.  
 4. Берлинер М. А. Электрические измерения, автоматический контроль и регулирование влажности. - Л.: Энергия, 1965. - 488 с.  
 5. Ваня Я. Анализаторы газов и жидкостей / Под ред. О. С. Арутюнова: Пер. с чеш. М.: Энергия, 1970. - 552 с.  
 6. ГОСТ 30319.1-96. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение физических свойств природного газа, его компонентов и продуктов его переработки. – Минск: Изд-во стандартов, 1997. - 18 с.