

Практичне заняття №1. ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ГАЗУ ЗА ЙОГО СКЛАДОМ.

Мета заняття: ознайомитись з основними фізико-хімічними властивостями природного газу, навчитись визначати основні параметри газу за його складом.

Тривалість заняття: 4 години.

Короткі теоретичні відомості.

Густина – це маса одиниці об'єму газу (відношення маси газу до його об'єму) при певних тиску і температурі.

Густина газу залежить від його складу, тиску і температури. Якщо відома молекулярна маса, то густину газу визначають за формулами:

- за нормальних умов

$$\rho_{г.о} = \frac{M_{г}}{22,4141},$$

- за стандартних умов

$$\rho_{г.ст} = \frac{M_{г}}{24,055},$$

де $\rho_{г.о}$, $\rho_{г.ст}$ - густина газу відповідно за нормальних і стандартних умов, кг/м³.

У газовій промисловості облік газу проводять за стандартних фізичних умов.

Для газоконденсатних сумішей зі значним вмістом конденсату густину суміші визначають за формулою:

$$\rho_{см} = \frac{\rho_{г} Q_{г} + \rho_{к} Q_{к}}{Q_{г} + \alpha_{к} Q_{к}},$$

де
$$\alpha_{к} = 24 \frac{\rho_{к}}{M_{к}},$$

ρ_z, ρ_k – густина газу і конденсату відповідно після сепаратора при p_{cm} і T_{cm} , кг/м³;

Q_z, Q_k – дебіт газу і конденсату відповідно при p_{cm} і T_{cm} , м³/д;

M_k – молекулярна маса конденсату, кг/кмоль;

α_k – уявний об'ємний коефіцієнт конденсату.

У нафтогазовій справі для практичних розрахунків часто використовують відносну густина газу, під якою розуміють відношення густини газу ρ_z до густини повітря за однакових умов (тиску і температури). Відносна густина газу зручна тим, що вона є сталою величиною та не залежить від тиску і температури, якщо знехтувати різницею в коефіцієнтах стисливості газу і повітря.

$$\bar{\rho}_z = \frac{\rho_{z.o}}{\rho_{n.o}} \quad \text{або} \quad \bar{\rho}_z = \frac{\rho_{z.o}}{1,293}$$

$$\bar{\rho}_z = \frac{\rho_{z.cm}}{\rho_{n.cm}} \quad \text{або} \quad \bar{\rho}_z = \frac{\rho_{z.cm}}{1,205},$$

де $\rho_{n.o}, \rho_{n.cm}$ – густина повітря відповідно за нормальних і стандартних умов, ($\rho_{n.o} = 1,293$ кг/м³; $\rho_{n.cm} = 1,205$ кг/м³).

Якщо відома молекулярна маса газу, то відносну густина знаходять за формулою:

$$\bar{\rho}_z = \frac{M_z}{M_n} = \frac{M_z}{28,979},$$

де M_n – молекулярна маса повітря ($M_n = 28,979$ кг/кмоль).

Густина газу при заданому тиску p і температурі T і відомій густині газу за стандартних умов визначають за формулою:

$$\rho_z(p, T) = \rho_{z.cm} \frac{p T_{cm}}{p_{cm} T},$$

де $\rho_{z.cm}$ – густина газу за стандартних умов, кг/м³;

p, T – відповідно заданий тиск і температура;

z – коефіцієнт стисливості газу за тиску p і температури T ;

T_{cm} – температура за стандартних умов, К

p_{at} – атмосферний тиск, МПа.

Стан газу характеризується тиском, температурою та об'ємом, який він займає. Для ідеального газу зв'язок між цими параметрами визначається рівнянням Клапейрона-Менделєєва:

$$pV = mRT,$$

де $R = \frac{\bar{R}}{M_z},$

p – тиск газу, Па;

T – температура газу, К;

V – об'єм газу, м³;

m – маса газу, кг;

$\bar{R}$ – універсальна газова стала, $\bar{R} = 8314,51$ Дж/(кмоль·К);

R – питома газова стала, Дж/(кг·К);

M_z – молекулярна маса газу, кг/кмоль.

Порівняно з ідеальним газом у реальному газі молекули мають певні розміри і взаємодіють між собою, що впливає на параметри стану газу. Тому для реального рівняння можна використовувати тільки за низьких тисків (до 1МПа).

Запропоновано ряд залежностей, які описують стан реального газу. Для інженерних розрахунків у газовій справі найчастіше використовують узагальнене рівняння Клапейрона-Менделєєва, в яке додатково вводять коефіцієнт, що враховує відхилення характеристик реального газу від ідеального:

$$pV = zmRT,$$

де z – коефіцієнт стисливості газу, частка одиниці.

У вітчизняній практиці для оперативного підрахунку коефіцієнта стисливості використовують наближену формулу:

$$Z = (0,4 \log(T_{np}) + 0,73) \frac{P}{P_{np}} + 0,1 \frac{P}{P_{np}},$$

Для практичних розрахунків, які не вимагають високої точності, псевдокритичні параметри з прийнятою точністю можна знайти за формулами:

$$p_{кр} = 4,892 - 0,4048 \cdot \bar{\rho}_c, \text{ МПа}$$

$$T_{кр} = 94,717 + 170,8 \cdot \bar{\rho}_c, \text{ К},$$

В'язкість – це властивість рідких і газоподібних речовин виявляти опір взаємному переміщенню сусідніх шарів (внутрішнє тертя). Кількісно в'язкість газу характеризується динамічним коефіцієнтом в'язкості μ , який має розмірність Н·с/м² або Па·с.

Наближено динамічний коефіцієнт в'язкості газу при заданих тиску і температурі залежно від зведеної густини газу можна визначити за такими кореляційними залежностями [3]:

$$\text{при } \rho_{зв} > 2 \quad \mu(p, T) = \mu(p_{ам}, t) + \frac{1}{\varepsilon \cdot 10^4} + \frac{1}{\varepsilon} \cdot (0,1023 + 0,023364 \cdot \rho_{зв} + 0,058533 \cdot \rho_{зв}^2 - 0,040758 \cdot \rho_{зв}^3 + 0,0093324 \cdot \rho_{зв}^4)$$

$$\text{при } 0,3 < \rho_{зв} \leq 2$$

$$\mu(p, T) = \mu(p_{ам}, t) + \frac{10,8 \cdot 10^{-5}}{\varepsilon} (e^{1,439 \rho_{зв}} - e^{-1,11 \rho_{зв}^{1,858}})$$

$$\text{при } \rho_{зв} \leq 0,3 \quad \mu(p, T) = \mu(p_{ам}, t) + \frac{11 \cdot 10^{-5}}{\varepsilon} \cdot (e^{1,58 \cdot \rho_{зв}} - 1),$$

$$\text{де } \rho_{зв} = 3485,34 \cdot \frac{\bar{\rho}_c \cdot p}{z(p) \cdot T \cdot p_{кр}},$$

$$\varepsilon = \frac{T_{кр}^{1/6}}{M^{1/2} \cdot (10 \cdot p_{кр})^{2/3}},$$

$$\rho_{кр} = 106,9514 + 99,276 \cdot \bar{\rho}_z,$$

$$M = 28,97 \cdot \bar{\rho}_z,$$

$$\mu(p_{ам}, t) = 0,0101 \cdot t^{1/8} - 5,76 \cdot 10^{-3} \cdot \bar{\rho}_z^{0,5},$$

M – молекулярна маса газу, кг/кмоль;

ε – комплексний параметр;

$\rho_{зв}$ – зведена густина газу;

p – тиск;

t – температура;

$\rho_{кр}$ – критична густина газу;

$\bar{\rho}_z$ – відносна густина газу;

$p, p_{кр}$ МПа; $t, ^\circ\text{C}$; T, K ; $\rho_{кр}$ кг/м³; μ , мПа·с.

Питомою теплоємністю називають ту кількість теплоти, яку необхідно підвести до одиниці маси речовини, щоб змінити її температуру на один градус. Для газів розрізняють ізобарну C_p та ізохорну C_v питому теплоємність.

Ізобарну теплоємність газу C_p , Дж/(кг·К) з молекулярною масою $16 \leq M_z \leq 60$ в інтервалі температур $273\text{K} \leq T \leq 373\text{K}$ визначають за формулою [2, 5]:

$$C_p = \frac{4300}{M_z^{0,225}} + 3,77(T - 323) + \frac{4187}{M_z} \Delta C_p,$$

де ΔC_p – поправка, яку визначають за графіком (рис. 1.) залежно від псевдозведеного тиску і псевдозведеної температури.

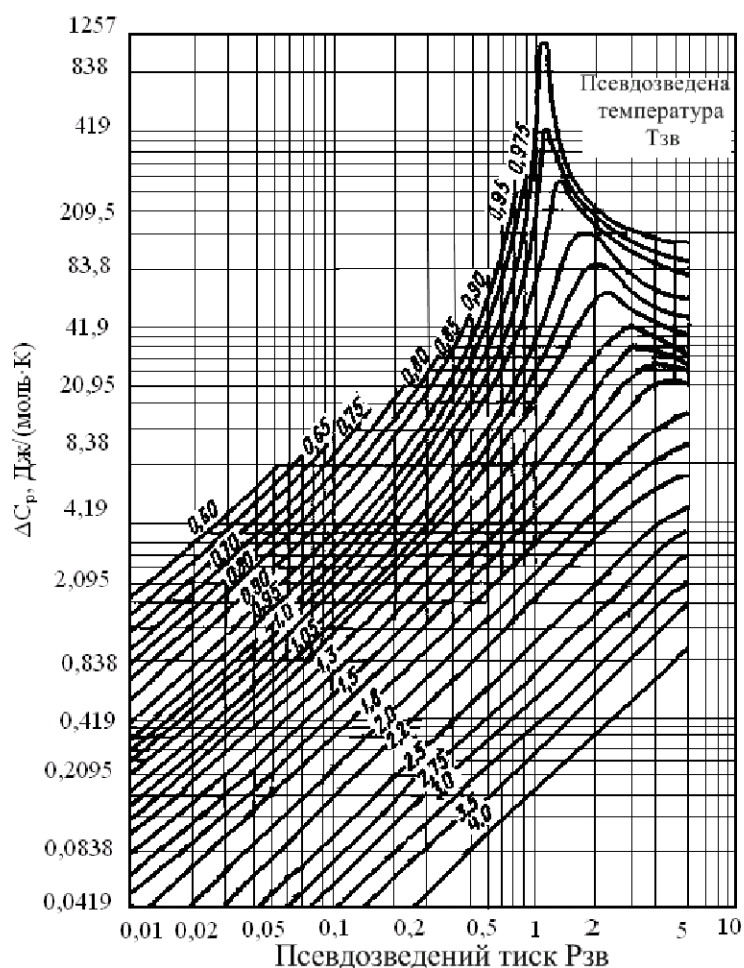


Рисунок 1 – Залежність ізотермічної поправки ізобарної молярної теплоємності (ΔC_p) від псевдозведеного тиску і температури

Значення молярної теплоємності компонентів природних газів при атмосферному тиску і різній температурі визначають за формулою:

$$C_{po} = 0,523(8,36 + 0,00892t)M_i^{3/4},$$

де C_{po} – ізобарна молярна теплоємність газу, кДж/кмоль·К;

t – температура, °С;

M_i – молекулярна маса i -ого компонента.

Ізобарну теплоємність суміші газів при атмосферному тиску визначають за правилом адитивності [3]:

$$C_{p.cm} = \sum_{i=1}^n y_i C_{pi} = 0,125(8,36 + 0,00892t) \sum_{i=1}^n y_i M_i^{3/4},$$

де y_i – мольна частка i -го компонента в суміші;

C_{pi} – ізобарна молярна теплоємність i -го компонента, ккал/кмоль·°С.

Ізобарна молярна теплоємність реальних природних газів залежить від тиску та температури і визначають за формулою:

$$C_p = C_{po}(t) + \Delta C_p(p, t),$$

де $\Delta C_p(p, t)$ – ізотермічна поправка теплоємності на тиск (рис. 1).

Для наближених розрахунків при $0,02 \leq p_{36} \leq 4$ і $1,3 \leq T_{36} \leq 2,5$, характерних для видобування і транспортування газу, поправку ΔC_p можна визначити з похибкою, яка не перевищує 10 %, за формулою:

$$\Delta C_p = 32,60 p_{36} / T_{36}^4, \text{кДж/кмоль} \cdot \text{К}$$

$$\Delta C_p = 7,77 p_{36} / T_{36}, \text{ккал/кмоль} \cdot \text{°С}.$$

Ізобарну молярну теплоємність природного газу можна визначити за формулою Гурмана Л.М. і Нагарєвої Т.В:

$$C_p = 3,15 + 0,02203T - 0,149 \cdot 10^{-4} T^2 + \frac{0,238 \cdot M \cdot p^{1,124}}{(T/100)^{5,08}},$$

де p – тиск, МПа.

Дроселювання – це розширення газу при проходженні через дросель – місцевий гідравлічний опір (вентиль, кран, звуження трубопроводу), яке супроводжується зниженням температури, викликане витратою енергії на подолання внутрішніх молекулярних сил взаємопритягання. Дроселювання – термодинамічний процес, який характеризується постійною ентальпією ($i = \text{const}$).

Зміна температури газів і рідин при адіабатному розширенні називається ефектом Джоуля-Томсона, а ε_i - коефіцієнтом Джоуля-Томсона:

$$\varepsilon_i = \left(\frac{dt}{dp} \right)_i.$$

Коефіцієнт Джоуля-Томсона визначають за формулою, К/МПа

$$\varepsilon_i = \frac{T_{кр} f(p_{36}, T_{36})}{p_{кр} C_p},$$

де $T_{кр}$ – псевдокритична температура вуглеводнів, К;

$p_{кр}$ – псевдокритичний тиск вуглеводнів, МПа;

C_p – ізобарна молярна теплоємність природного газу, Дж/(моль·К);

$f(p_{36}, T_{36})$ – функція псевдозведених тиску і температури, яка визначається графічно або за кореляційними залежностями Гурмана Л.М. і Нагаєвої Т.В. (з похибкою, меншою 7 % при $1,6 \leq T_{36} \leq 2,1$ і $0,8 \leq p_{36} \leq 3,5$):

$$f(p_{36}, T_{36}) = 2,243T_{36}^{-2,04} - 0,071(p_{36} - 0,8).$$

Природні гази в суміші з киснем (з повітрям) утворюють горючу суміш, яка може вибухати з великою силою, причому сила вибуху збільшується прямопропорційно збільшенню тиску суміші.

Природні гази можуть вибухати тільки при певних граничних концентраціях газу в газоповітряній суміші від деякого мінімуму (нижня границя вибуховості) до деякого максимуму (верхня границя вибуховості).

Нижня границя вибуховості характеризується кількістю газу, якого недостатньо для нормального процесу горіння. Верхня границя вибуховості характеризує кількість повітря (кисню), якого недостатньо для нормального процесу горіння.

Границя вибуховості розраховується наступним чином:

$$L_f = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{\frac{x_1}{L_{f_1}} + \frac{x_2}{L_{f_2}} + \dots + \frac{x_n}{L_{f_n}}} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{L_{f_i}}};$$

$$L_A = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{\frac{x_1}{L_{A_1}} + \frac{x_2}{L_{A_2}} + \dots + \frac{x_n}{L_{A_n}}} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{L_{A_i}}}.$$

Типові задачі

Задача №1. Визначте густину газу, який складається з метану, етану, пропану і бутану та знаходиться при температурі (Т) і тиску (Р).

№ варіанту	Метан, %	Етан, %	Пропан, %	Бутан, %	Температура, К	Тиск, МПа
1	90	7	2	1	331	2
2	89	6	2	3	333	3
3	90	2	1	7	332	4
4	89	3	2	6	334	2,5
5	88	3	2	7	335	3,2
6	87	2	2	9	331	4,1
7	88	1	3	8	330	2
8	89	3	2	6	330	3,4
9	90	4	3	3	331	3,5
10	91	3	4	2	332	3,8
11	92	2	3	3	334	2,6
12	93	3	2	2	332	2,4
13	90	2	3	5	334	4,2
14	91	1	3	5	335	4,8
15	94	4	1	1	336	4
16	92	3	2	3	334	3
17	93	2	3	2	332	2
18	92	2	2	4	333	3
19	91	3	3	3	332	5
20	90	4	2	4	331	4,7

Задача №2. В пустий бак об'ємом (V), і масою (m) закачали природний газ відносною густиною $\bar{\rho}$ при стандартних умовах. Визначити об'єм закачаного газу, якщо маса балону збільшилась на Δm . Температура газу t .

№ варіанту	Обєм бака, л	Маса бака, кг	Відносна густина	Збільшення маси бака, кг	Температура, °C
1	90	7	0,62	10	13
2	89	6	0,63	13	10
3	90	2	0,64	7	11
4	89	3	0,64	6	9
5	88	3	0,65	17	8
6	87	2	0,615	9	8
7	88	1	0,62	18	9
8	89	3	0,625	16	10
9	90	4	0,63	13	11
10	91	3	0,64	12	4
11	92	2	0,65	13	5
12	93	3	0,63	12	7
13	90	2	0,635	15	6
14	91	1	0,64	15	6
15	94	4	0,626	11	8
16	92	3	0,623	13	9
17	93	2	0,625	12	10
18	92	2	0,631	14	10
19	91	3	0,64	13	9
20	90	4	0,63	14	9

Задача №3. Визначити коефіцієнт Джоуля-Томсона за тиску (Р) і температури (Т), якщо відомо об'ємний (молярний) склад газу:

№ варіанту	Метан, %	Етан, %	Пропан, %	Нормальний бутан, %	Ізопентан, %	Азот, %	Температура, К	Тиск, МПа
1	90	6	2	1	0,5	0,5	331	2
2	89	5	2	2	0,7	0,3	333	3
3	90	6	1	2	0,6	0,4	332	4
4	89	6	2	2	0,8	0,2	334	2,5
5	88	7	2	2	0,8	0,2	335	3,2
6	87	8	2	2	0,7	0,3	331	4,1
7	88	7	3	1	0,6	0,4	330	2
8	89	5	2	3	0,5	0,5	330	3,4
9	90	4	3	3	0,5	0,5	331	3,5
10	91	3	4	1	0,6	0,4	332	3,8
11	92	3	3	2	0,7	0,3	334	2,6
12	93	3	2	1	0,8	0,2	332	2,4
13	90	5	3	1	0,6	0,4	334	4,2
14	91	4	3	1	0,6	0,4	335	4,8
15	94	3	1	1	0,5	0,5	336	4
16	92	3	2	2	0,6	0,4	334	3
17	93	2	3	1	0,7	0,3	332	2
18	92	4	2	1	0,7	0,3	333	3
19	91	3	3	2	0,8	0,2	332	5
20	90	4	2	3	0,7	0,3	331	4,7

Задача №4. Визначити верхню та нижню границі вибуховості природного газу, наступного складу:

№ варіанту	Метан, %	Етан, %	Пропан, %	Нормальний бутан, %	Ізопентан, %	Азот, %
1	90	6	2	1	0,5	0,5
2	89	5	2	2	0,7	0,3
3	90	6	1	2	0,6	0,4
4	89	6	2	2	0,8	0,2
5	88	7	2	2	0,8	0,2
6	87	8	2	2	0,7	0,3
7	88	7	3	1	0,6	0,4
8	89	5	2	3	0,5	0,5
9	90	4	3	3	0,5	0,5
10	91	3	4	1	0,6	0,4
11	92	3	3	2	0,7	0,3
12	93	3	2	1	0,8	0,2
13	90	5	3	1	0,6	0,4
14	91	4	3	1	0,6	0,4
15	94	3	1	1	0,5	0,5
16	92	3	2	2	0,6	0,4
17	93	2	3	1	0,7	0,3
18	92	4	2	1	0,7	0,3
19	91	3	3	2	0,8	0,2
20	90	4	2	3	0,7	0,3

Питання для контролю знань та обговорення

1. Як визначити коефіцієнт стисливості газу відомого складу за заданих тиску і температури?
2. Як визначити динамічний коефіцієнт в'язкості газу відомого складу за заданих тиску і температури?
3. Охарактеризуйте фізичну суть ефекту Джоуля-Томсона і напрямки його ефективного використання в технологічних процесах видобування газу.
4. Опишіть небезпечні властивості газу.