

## АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

© Матіко Ф.Д., Федоришин Р.М., 2007  
Національний університет "Львівська політехніка"**Запропонований алгоритм визначення коефіцієнта теплопровідності природного газу в робочих умовах шляхом його розрахунку як для газових сумішей, що включають неполярні і полярні гази**

Для розрахунку теплообмінних процесів між потоком природного газу та зовнішнім середовищем, для вирішення задач підвищення точності обліку природного газу виникає необхідність точного розрахунку коефіцієнта теплопровідності природного газу. Для цього необхідно мати відповідний алгоритм розрахунку теплопровідності природного газу.

Природний газ є багатокомпонентною сумішшю газів, до складу якої, крім насичених вуглеводнів (метан, етан, пропан, бутани, пентан і т.д.), входять неполярні гази (оксид вуглецю, азот, кисень, інертні гази) та щонайменше один полярний компонент – сірководень. Це означає, що теплопровідність природного газу необхідно розраховувати як для сумішей полярних газів з неполярними.

Розрахунок теплопровідності природного газу в робочих умовах проводять, як правило, методом надлишкової теплопровідності [1, 2], тобто спочатку проводять розрахунок теплопровідності за робочої температури для низького тиску, а після цього обчислюють надлишкову складову теплопровідності природного газу за робочого тиску. Теплопровідність у робочих умовах знаходять як суму теплопровідності за робочої температури та низького тиску та складової теплопровідності природного газу за робочого (високого) тиску. Вплив температури на теплопровідність газової суміші враховується через зміну теплопровідностей складових чистих компонентів при розрахунку теплопровідності газової суміші для низьких тисків [1].

В даній роботі представлений алгоритм розрахунку теплопровідності природного газу на базі вищевказаного методу надлишкової теплопровідності із застосуванням методу Ченга, Бромлі, Вільке та кореляції Стіла і Тодоса для високого тиску [1]. Алгоритм удосконалений та адаптований для розрахунку теплопровідності природного газу, склад якого визначається вмістом наступних восьми компонентів: метан, етан, пропан, бутан, ізобутан, азот, діоксид вуглецю, сірководень.

За результатами аналізу методів розрахунку теплопровідності газової суміші при низьких тисках

було встановлено, що одним із найточніших є метод Ченга, Бромлі, Вільке [1], в основі якого лежить рівняння Васильєвої. Цей метод придатний для розрахунку теплопровідності як суміші з неполярних газів, так і суміші неполярних з полярними газами. Відповідно до цього методу теплопровідність газової суміші, що складається з  $n$  компонентів, розраховується за наступним рівнянням:

$$\lambda_m^0 = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i^*}{1 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \left( \frac{M_{ij}}{M_i} \right)^{1/8} \cdot \phi_{ij} \cdot \frac{y_j}{y_i}} + \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i^{**}}{1 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \phi_{ij} \cdot \frac{y_j}{y_i}}, \quad (1)$$

де  $\lambda_i^*$ ,  $\lambda_i^{**}$  – складові параметри теплопровідності чистого  $i$ -го компоненту газової суміші;  $M_i$  – молярна маса  $i$ -го компоненту газової суміші;  $M_{ij}$  – комбінована молярна маса  $i$ -го та  $j$ -го компонентів газової суміші;  $\phi_{ij}$  – параметр в'язкості газової суміші;  $y_i$ ,  $y_j$  – мольна доля  $i$ -го та  $j$ -го компоненту газової суміші.

Складовий параметр теплопровідності  $\lambda_i^*$  для лінійних молекул розраховується за наступним рівнянням [1]:

$$\lambda_i^* = \frac{\lambda_i}{1 + 0,35 \cdot \left( \frac{C_{v_i}}{R} - 1 \right)}, \quad (2)$$

де  $\lambda_i$  – теплопровідність чистого  $i$ -го компонента газової суміші за робочої температури при низькому тиску (наприклад при 0,1 МПа),  $C_{v_i}$  – ізохорична теплоємність чистого  $i$ -го компонента газової суміші за робочої температури при низькому тиску,  $R$  – універсальна газова стала.

Складовий параметр теплопровідності  $\lambda_i^{**}$  розраховується за наступним рівнянням [1]:

$$\lambda_i^{**} = \lambda_i - \lambda_i^*. \quad (3)$$

Теплопровідність чистих компонентів газової суміші за робочої температури при низькому тиску

розраховується за методом Майзика і Тодоса [1] таким чином:

$$\lambda_i = 10^{-6} \cdot (14,52 \cdot T_{ri} - 5,14)^{2/3} \cdot \frac{C_{pi}}{\gamma_i}, \quad (4)$$

де  $T_{ri}$  – приведена температура для  $i$ -го компонента газової суміші,  $C_{pi}$  – ізобарична теплоємність чистого  $i$ -го компонента газової суміші за робочої температури при низькому тиску,  $\gamma_i$  – параметр теплопровідності чистого  $i$ -го компоненту газової суміші за робочої температури при низькому тиску.

Приведена температура для  $i$ -го компонента газової суміші визначається за наступним рівнянням:

$$T_{ri} = T/T_{ci}, \quad (5)$$

де  $T$  – робоча температура, для якої здійснюють розрахунок теплопровідності газової суміші;  $T_{ci}$  – критична температура чистого  $i$ -го компонента газової суміші.

Параметр теплопровідності  $\gamma_i$  чистого  $i$ -го компоненту газової суміші розраховується так [1]:

$$\gamma_i = T_{ci}^{1/6} \cdot M_i^{1/2} / P_{ci}^{2/3}, \quad (6)$$

де  $P_{ci}$  – критичний тиск чистого  $i$ -го компонента газової суміші.

Теплоємність (ентальпія) реального газу за низького тиску є близькою до теплоємності (ентальпії) ідеального газу [1]. Тому ізобаричну та ізохоричну теплоємності ( $C_{pi}$  та  $C_{vi}$ ) чистих компонентів природного газу за робочої температури при низькому тиску (в ідеальному стані) можна розрахувати за методикою згідно[3].

Комбіновану молярну масу розраховують за наступною формулою [1]:

$$M_{ij} = (M_i + M_j) / 2. \quad (7)$$

Одним із вдалих методів визначення параметра в'язкості газової суміші  $\phi_{ij}$  для рівняння (1) є метод Вільке [1], в основі якого лежить апроксимація коефіцієнта дифузії з рівняння Сатерленда, побудованого на моделі кінетичної теорії:

$$\phi_{ij} = \frac{[1 + (\mu_i/\mu_j)^{1/2} \cdot (M_j/M_i)^{1/4}]^2}{\sqrt{8} \cdot [1 + (M_i/M_j)]^{1/2}}, \quad (8)$$

де  $\mu_i$ ,  $\mu_j$  – в'язкість чистих  $i$ -го та  $j$ -го компонентів газової суміші за робочої температури при низькому тиску.

В'язкість чистих компонентів газової суміші за робочої температури при низькому тиску необхідно розраховувати за методом Стіла і Тодоса [1], згідно з яким для неполярних газів

$$\mu_i = 34 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{T_{ri}^{0,94}}{\xi_i}, \quad \text{при } T_{ri} \leq 1,5; \quad (9)$$

$$\mu_i = 17,78 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{(4,58 \cdot T_{ri} - 1,67)^{5/8}}{\xi_i}, \quad \text{при } T_{ri} > 1,5, \quad (10)$$

де  $\xi_i$  – параметр в'язкості чистого  $i$ -го компоненту газової суміші за робочої температури при низькому тиску.

Параметр в'язкості  $\xi_i$  чистого  $i$ -го компоненту розраховується за наступною формулою [1]:

$$\xi_i = \frac{T_{ci}^{1/6}}{M_i^{1/2} \cdot P_{ci}^{2/3}}. \quad (11)$$

За рівнянням (8) отримують задовільні результати тільки при його застосуванні для двох неполярних газів. Розрахунок параметра  $\phi_{ij}$  для полярного та неполярного газів необхідно здійснювати за наступною залежністю [1]:

$$\phi_{ij} = 0,25 \cdot \left( \frac{M_i}{M_{ij}} \right)^{1/2} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{V_{bj}}{V_{bi}} \right)^{1/3} \right]^2 \cdot \frac{T + F'_{ji} \cdot S_{ij}}{T + S_i}, \quad (12)$$

де  $V_{bi}$ ,  $V_{bj}$  – молярні об'єми рідких чистих  $i$ -го та  $j$ -го компонентів газової суміші при нормальній температурі кипіння;  $F'_{ji}$  – функція відношення  $V_{bj}/V_{bi}$ ;  $S_i$  – стала Сатерленда;  $S_{ij}$  – стала взаємодії Сатерленда.

Простим і достатньо точним методом визначення молярного об'єму чистих рідин при нормальній температурі кипіння є метод Бенсона [1], відповідно до якого

$$V_{bi} = \frac{V_{ci}}{0,422 \cdot \lg P_{ci} + 1,981}, \quad (13)$$

де  $V_{ci}$  – критичний молярний об'єм чистого  $i$ -го компоненту газової суміші.

Функція відношення  $V_{bj}/V_{bi}$  визначається за допомогою даних табл.1 [1].

Таблиця 1 – Значення функції відношення  $V_{bj}/V_{bi}$

$V_{bj}/V_{bi} > 1$	1	2	3	4	6	8	10
$F'_{ji} = F'_{ij}$	1,00	0,98	0,953	0,920	0,875	0,838	0,805

Сталу Сатерленда пропонується розраховувати за наступною формулою [1]:

$$S_i = 1,5 \cdot T_{bi}, \quad (14)$$

де  $T_{bi}$  – нормальна температура кипіння  $i$ -го компоненту газової суміші.

Стала взаємодії Сатерленда для суміші полярного і неполярного газів може бути розрахована таким чином [1]:

$$S_{ij} = S_{ji} = 0,733 \cdot (S_i \cdot S_j)^{1/2}. \quad (15)$$

Визначення теплопровідності газової суміші за робочого (високого) тиску є можливим, якщо вважати суміш гіпотетично як чистий компонент з відповідними псевдокритичними властивостями. Найкращим методом для визначення теплопровідності газу за високого тиску є кореляція Стіла і Годоса, яка має наступний вигляд [1]:

$$\lambda_m = \lambda_m^0 + \frac{14,0 \cdot 10^{-8}}{\gamma_m \cdot Z_{c_m}^5} \cdot (e^{0,535 \rho_{r_m}} - 1),$$

при  $\rho_{r_m} < 0,5$ ; (16)

$$\lambda_m = \lambda_m^0 + \frac{13,1 \cdot 10^{-8}}{\gamma_m \cdot Z_{c_m}^5} \cdot (e^{0,67 \rho_{r_m}} - 1,069),$$

при  $0,5 < \rho_{r_m} < 2,0$ ; (17)

$$\lambda_m = \lambda_m^0 + \frac{2,976 \cdot 10^{-8}}{\gamma_m \cdot Z_{c_m}^5} \cdot (e^{1,155 \rho_{r_m}} + 2,016),$$

при  $2,0 < \rho_{r_m} < 2,8$ , (18)

де  $\lambda_m^0$  – теплопровідність природного газу за низького тиску (розраховується за рівнянням (1)),  $\gamma_m$  – параметр теплопровідності газової суміші,  $Z_{c_m}$  – псевдокритичний фактор стисливості газової суміші,  $\rho_{r_m}$  – приведена густина газової суміші.

Параметр теплопровідності газової суміші  $\gamma_m$  розраховується за наступним рівнянням [1]:

$$\gamma_m = T_{c_m}^{1/6} \cdot M_m^{1/2} / P_{c_m}^{2/3}, \quad (19)$$

де  $T_{c_m}$  – псевдокритична температура газової суміші,  $M_m$  – молярна маса газової суміші,  $P_{c_m}$  – псевдокритичний тиск газової суміші.

Приведена густина газової суміші розраховується за наступним рівнянням [1]:

$$\rho_{r_m} = V_{c_m} / V_m, \quad (20)$$

де  $V_{c_m}$  – псевдокритичний молярний об'єм газової суміші,  $V_m$  – молярний об'єм газової суміші в робочих умовах.

Відповідно до правил визначення псевдокритичних констант Праусніца і Ганна значення  $T_{c_m}$ ,  $V_{c_m}$  і  $Z_{c_m}$  повинні розраховуватися за правилом адитивності, тобто

$$T_{c_m} = \sum_{i=1}^n y_i \cdot T_{c_i};$$

$$V_{c_m} = \sum_{i=1}^n y_i \cdot V_{c_i}; \quad (21)$$

$$Z_{c_m} = \sum_{i=1}^n y_i \cdot Z_{c_i}.$$

Молярну масу газової суміші  $M_m$  необхідно також обчислювати за правилом адитивності, а  $P_{c_m}$  – за таким рівнянням:

$$P_{c_m} = Z_{c_m} \cdot R \cdot T_{c_m} / V_{c_m}. \quad (22)$$

Значення молярного об'єму газової суміші за робочих умов  $V_m$  розраховують за наступним рівнянням [1]:

$$V_m = Z_m \cdot R \cdot T / P, \quad (23)$$

де  $Z_m$  – фактор стисливості газової суміші за робочих умов, який є функцією температури, тиску та складу (для природного газу розраховується за [4]). Одним з найточніших для даних умов є метод ВНИЦ СМВ.

Для всіх наведених вище залежностей згідно [1] застосовують наступні розмірності параметрів:  $[P] = \text{атм}$ ,  $[V] = \text{см}^3/\text{моль}$ ,  $[T] = \text{К}$ ,  $[\lambda] = \text{кал}/(\text{см} \cdot \text{сек} \cdot \text{град})$ ,  $[\mu] = \text{спз}$ ,  $[C_p] = [C_v] = \text{кал}/(\text{моль} \cdot \text{град})$ .

Порівняння результатів розрахунку коефіцієнтів теплопровідності за представленою вище методикою з даними згідно [5] для природного газу з різним складом наведено в табл. 2.

В [6] наведені значення теплопровідності метану в залежності від температури та тиску. Порівняння розрахованих значень за наведеною вище методикою із даними згідно [6] показано на рис. 1.

Таблиця 2 – Порівняння значень коефіцієнтів теплопровідності природного газу при 20 °С і 760 мм. рт. ст.

Назва газу	Склад газу, %								$\lambda \cdot 10^3$ , Вт/(м·К)		$\delta$ , %
	метан	етан	пропан	н-бутан	і-бутан	азот	діоксид вуглецю	сірководень	за викладеною методикою	за даними [5]	
Дашавський	97,9	0,5	0,2	0,1	0	1,2	0,1	0	31,32	30,24	+3,5 7
Саратовський	94,0	1,2	0,7	0,4	0	3,3	0,2	0	30,78	29,08	+5,8 8
Мелітопольський	97,9	0	0	0,1	0	1,8	0,2	0	31,39	30,24	3,81
Курдюмський	92,2	0,8	0	0,1	0	6,9	0	0	30,93	24,42	26,63
Ставропольський	98,0	0,4	0,2	0	0	1,3	0,1	0	31,36	30,24	3,73
Шебелинський	89,9	3,1	0,9	0,4	0	5,2	0,3	0	30,28	23,26	30,17
Ухтинський	88,0	1,9	0,2	0,3	0	9,3	0,3	0	30,39	23,26	30,65

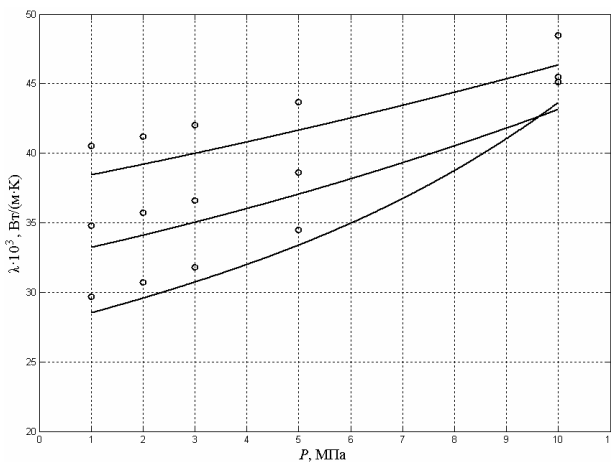


Рис. 1. Залежність теплопровідності метану від тиску за різних температур

Із отриманих результатів видно, що при збільшенні вмісту азоту в природному газі вище 5% похибка визначення коефіцієнта теплопровідності за викладеною методикою зростає (табл.2) і може сягати 30%. Для природного газу, у складі якого вміст азоту не перевищує 3,3%, відносна похибка визначення коефіцієнта теплопровідності не перевищує 5,88%.

Оскільки при комерційному обліку природного газу вміст азоту в ньому не перевищує 2,5 %, то для таких умов можна розраховувати коефіцієнт теплопровідності природного газу згідно викладеної методики із задовільною точністю, тобто похибка розрахунку буде меншою за 5%.

При визначенні теплопровідності чистого метану за викладеною методикою виникають від'ємні похибки, середнє значення яких становить мінус 4%.

Як видно із отриманих результатів, відхилення розрахункових значень коефіцієнта теплопровідності згідно вказаної методики відносно експериментальних значень теплопровідності природних газів та метану [5, 6] мають як додатній, так і від'ємний знак. Отже, відхилення значень методики в цілому симетрично розподілені відносно нульового значення і похибка методики не має значної систематичної складової. Тому теплопровідність природних газів, в яких основним компонентом є метан і вміст азоту не перевищує 2,5 %, може бути розрахована за наведеною методикою із похибкою, що не перевищує  $\pm 5$  % для низького тиску.

1. Рид Р., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей. Перев. с англ. под ред. проф. Когана В. Б. – Л.: Химия. - Л., 1971. – 704 с. 2. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент. Справочник. Под общей редакцией В.А. Григорьева и В.М. Зорина. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 560 с. 3. ГОСТ 30319.3-96 Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение физических свойств по уравнению состояния. 4. ГОСТ 30319.2-96. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение коэффициента сжимаемости. 5. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов. – М: Физматгиз, 1959. – 356 с. 6. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов / Н.Б. Варгафтик, Л.П. Филиппов, А.А. Тарзиманов, Е.Е. Тоцкий. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352с.

