

# Актуальні питання нафтогазової галузі

УДК 622.612.52:622.612.51

## ТЕМПЕРАТУРА ГОРІННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ ЯК КРИТЕРІЙ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

Я.В. Грудз, В.П. Гоцуляк, М.Я. Криль

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15,  
e-mail: snp@nimg.edu.ua

*Розглядається процес горіння вуглеводневих газів у повітряному середовищі, наведено результати досліджень впливу молекулярної маси енергоносія та коефіцієнта надлишку повітря на величину температури горіння. Побудовано математичну модель, яка встановлює взаємозв'язок між теплотворною здатністю вуглеводневих енергоносіїв та температурою горіння за різних умов протікання процесу. Запропонований алгоритм реалізації створеної математичної моделі дав змогу отримати результати, що характеризують вплив молекулярної маси вуглеводневого газу і коефіцієнту надлишку повітря на температуру горіння в числовому вигляді. Побудовані графічні залежності дають можливість оцінити вплив параметрів процесу на температуру горіння та енергоефективність використання природного газу як суміші вуглеводневих енергоносіїв.*

Ключові слова: теплотворна здатність, вуглеводневий енергоносіє, температура горіння, молекулярна маса, коефіцієнт надлишку повітря.

*Rассматривается процесс горения углеводородных газов в воздушной среде, приведены результаты исследований влияния молекулярной массы энергоносителя и коэффициента избытка воздуха на величину температуры горения. Построена математическая модель, устанавливающая взаимосвязь между теплотворной способностью углеводородных энергоносителей и температурой горения при различных условиях протекания процесса. Предложенный алгоритм реализации созданной математической модели позволил получить результаты, характеризующие влияние молекулярной массы углеводородного газа и коэффициента избытка воздуха на температуру горения в числовом виде. Построенные графические зависимости позволяют оценить влияние параметров процесса на температуру горения и энергоэффективность использования природного газа в качестве смеси углеводородных энергоносителей.*

Ключевые слова: теплотворная способность, углеводородный энергоноситель, температура горения, молекулярная масса, коэффициент избытка воздуха.

*The process of the hydrocarbon gases combustion in the air is described. The research results of the influence of the energy resource molecular mass and the excess air factor on the combustion temperature value are given. The mathematical model has been developed. It establishes the relationship between the calorific value of hydrocarbon energy sources and the combustion temperature under different conditions of the process. The proposed algorithm for implementation of the developed mathematical model allowed to obtain the results characterizing the influence of the molecular weight of hydrocarbon gas and the excess air factor on the combustion temperature in numerical form. The graphic dependences constructed allow to estimate the influence of process parameters on the combustion temperature, which in their turn will allow to estimate the natural gas energy efficiency as a mixture of hydrocarbon energy sources.*

Key words: calorific value, hydrocarbon energy resource, combustion temperature, molecular mass, excess air factor.

**Вступ.** В умовах підвищення світових цін на енергоносії щораз актуальнішими стають вимоги до природного газу. Зростання кількості джерел видобутку газу з різним його компонен-

тним складом і умовами підготовки до транспортування є причиною надходження споживача енергоносія з широким діапазоном характеристик енергоефективності у відповідності до

яких повинна визначатися і його ціна. Тому оцінка якості природного газу як пального повинна базуватися на дослідженнях залежності його енергетичних характеристик від параметрів кондиційності (компонентного складу, вологості наявності домішок та ін.)

**Огляд літературних джерел.** Одною з важливих характеристик природного газу як пального є його теплотворна здатність – кількість енергії, яка виділяється при повному згорянні одиниці маси (одиниці об'єму) [1,2].

Під теплотворною здатністю розуміють теплоту повного згорання одиниці маси речовини. У ній враховуються втрати тепла, пов'язані з дисоціацією продуктів згорання і незавершеною хімічних реакцій горіння. Теплотворна здатність - це максимально можлива теплота згорання одиниці маси речовини. Визначають теплотворну здатність елементів, їх з'єднань і паливних сумішей. Для елементів вона чисельно дорівнює теплоті утворення продукту згорання. Теплотворна здатність сумішей є адитивною величиною, яку можна обчислити за відомою теплотворною здатністю компонентів суміші.

Втім горіння відбувається не лише за рахунок утворення оксидів. Тому для якнайточнішого в широкому сенсі обчислення енергоефективності слід розглядати теплотворні здатності елементів та їх сполук не тільки в кисні, а і при взаємодії з фтором, хлором, азотом, бором, вуглецем, кремнієм, сіркою і фосфором.

Зовнішнім фактором, який характеризує вуглеводневу сполуку як енергоносію і тісно пов'язаний з теплотворною здатністю, є температура горіння. Остання піддається вимірюванню і контролю в процесі спалювання, тому важливо встановити взаємозв'язок між теплотворною здатністю пального і температурою горіння.

**Метою дослідження** є встановлення взаємозв'язку між теплотворною здатністю вуглеводневих горючих газів температурою горіння, та визначення впливу на процес горіння молекулярної маси енергоносіїв і коефіцієнта надлишку повітря [3, 4].

**Виклад основного матеріалу.** Теплотворна здатність є важливою характеристикою. Вона дозволяє оцінити і порівняти з іншими максимально можливе тепловиділення тієї чи іншої окислювально-відновної реакції і визначити за відношенням до нього повноту протікання реальних процесів горіння. Знання теплотворної здатності необхідне при виборі компонентів палив і сумішей різного призначення і при оцінці повноти їх згорання.

Прийнято розрізняти нижчу  $Q_p^H$  і вищу  $Q_p^B$  теплотворну здатність, що пов'язано з наявністю в пальному вологі, на випаровування якої витрачається деяка кількість тепла. Зв'язок між ними виражає залежність

$$Q_p^H = Q_p^B - Q_n(9H + W), \quad (1)$$

де  $Q_n$  – тепло, що витрачається на випаровування одиниці маси вологі;

$H, W$  – відповідно частки водню і вологі в газі.

Кількість повітря, теоретично необхідна для згорання одиниці маси (1 кг) газу, може бути визначена на основі стехіометричних співвідношень, побудованих на основі хімічних реакцій горіння [3]

$$L_0 = \frac{1}{0,232} \left( \frac{8}{3} C + 8H + S - O \right), \quad (2)$$

де  $C, H, S, O$  – масові частки вуглецю, водню, сірки та кисню в газі.

В технічних системах природний газ як пальне згоряє при певному надлишку повітря  $L$ , що характеризується коефіцієнтом надлишку повітря

$$\alpha = (L_0 + L) / L_0. \quad (3)$$

Сумарна маса продуктів згорання, що утворилися при повному згорянні 1 кг газу, складає

$$M_{n3} = M_{CO_2} + M_{N_2} + M_{H_2O}, \quad (4)$$

де  $M_{CO_2}; M_{N_2}; M_{H_2O}$  – відповідно маси вуглекислого газу, азоту і водяної пари, що утворилися в результаті повного згорання газу.

Масові частки чистих продуктів згорання визначаються зі співвідношень

$$r_{CO_2} = \frac{M_{CO_2}}{M_{n3}}; r_{N_2} = \frac{M_{N_2}}{M_{n3}}; r_{H_2O} = \frac{M_{H_2O}}{M_{n3}}. \quad (5)$$

Зв'язок між коефіцієнтом надлишку повітря і температурою продуктів згорання визначається рівнянням балансу тепла

$$Q_{нов} + Q_{газ} + Q_{гор} = Q_{чнз} + Q_{над}, \quad (6)$$

де  $Q_{нов}$  – фізичне тепло, що вноситься з повітрям, з температурою  $t_n$ ;

$Q_{газ}$  – фізичне тепло, що вноситься з газом, з температурою  $t_2$ ;

$Q_{гор}$  – тепло, що виділяється в результаті горіння газу;

$Q_{чнз}$  – тепло чистих продуктів згорання;

$Q_{над}$  – тепло надлишкового повітря.

Фізичне тепло, що вноситься з повітрям

$$Q_{нов} = \alpha L_0 I_{нов}^0, \quad (7)$$

де  $I_{нов}^0 = c_p^n t_n$  – ентальпія повітря з ізобарною теплоємністю  $c_p^n$ .

Фізичне тепло, що вноситься з газом -

$$Q_{газ} = c_p^2 t_2. \quad (8)$$

Тепло, що виділяється в результаті горіння газу -

$$Q_{гор} = Q_p^H \eta, \quad (9)$$

де  $\eta$  – ККД системи спалювання.

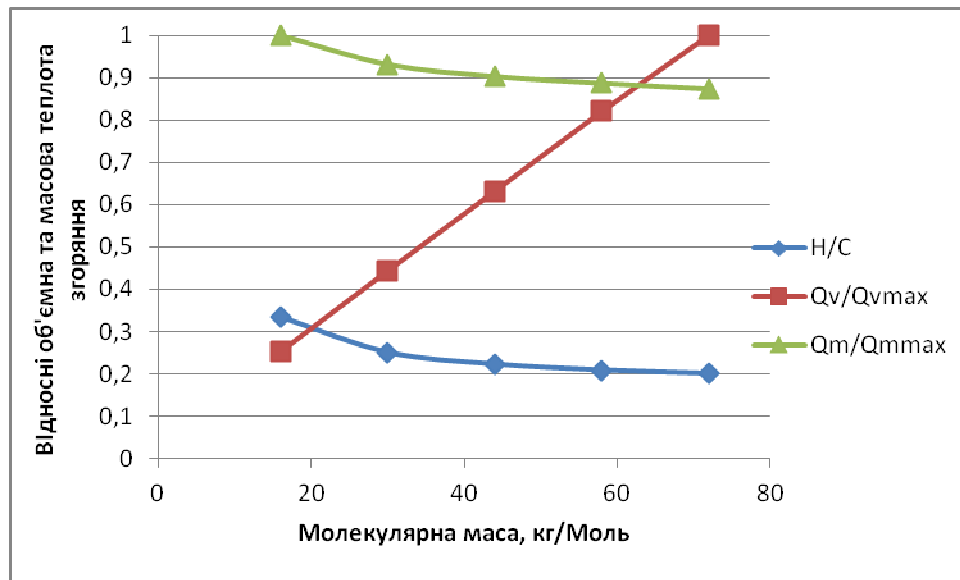


Рисунок 1 – Залежність об'ємної та масової теплоти згоряння вуглеводневих газів від їх молекулярної маси

Тепло чистих продуктів згоряння

$$Q_{чнс} = (L_0 + 1)I_{чнс}, \quad (10)$$

де  $I_{чнс}$  - ентальпія чистих продуктів згоряння

$$I_{чнс} = I_{CO_2}r_{CO_2} + I_{N_2}r_{N_2} + I_{H_2O}r_{H_2O}.$$

Ентальпія вуглекислого газу, азоту та водяної пари визначаються за відповідними середніми масовими теплоємностями в інтервалі температур від 0 до  $t_{нз}$ .

$$I_{CO_2} = c_p^{CO_2}t_{нз}; \quad I_{N_2} = c_p^{N_2}t_{нз}; \quad I_{H_2O} = c_p^{H_2O}t_{нз}.$$

Тепло надлишкового повітря за температури згоряння

$$Q_{над} = (\alpha - 1)L_0I_n. \quad (11)$$

Ентальпія надлишкового повітря

$$I_n = c_p^{nob}t_{нз}.$$

Використавши рівняння балансу тепла у формі (6), отримаємо

$$\begin{aligned} \alpha L_0 c_p^n t_n + c_p^2 t_z + Q_p^H \eta = \\ = (L_0 + 1)c_p^{нз} t_{нз} + (\alpha - 1)L_0 c_p^{nob} t_{нз}. \end{aligned} \quad (12)$$

З (12) визначається температура продуктів згоряння як функція теплотворної здатності та коефіцієнта надлишку повітря

$$t_{нз} = \frac{\alpha L_0 c_p^n t_n + c_p^2 t_z + Q_p^H \eta}{(L_0 + 1)c_p^{нз} + (\alpha - 1)L_0 c_p^{nob}}. \quad (13)$$

В (13) теплоємності продуктів згоряння  $c_p^{нз}$  та надлишкового повітря  $c_p^{nob}$  визначаються як масові середні в діапазоні температур 0 -  $t_{нз}$ . В зв'язку з тим, що температура продуктів згоряння  $t_{нз}$  на початковій стадії розрахунку невідома, то пропонується використати ітераційну процедуру, яка полягає в довільному виборі на початковій ітерації значення  $t_{нз}$ , подальшому

визначенні теплоємностей  $c_p^{нз}$  і  $c_p^{nob}$ , та уточненні температури продуктів згоряння за (13). Процедура виконується до досягнення необхідної точності.

Аналіз залежності (13) для визначення температури горіння свідчить, що основним визначальним фактором є питома теплота згоряння палива, оскільки величина енергії, що вноситься повітрям та паливним газом, суттєво менші. Тому збільшення питомої масової теплоти згоряння паливного газу  $Q_m$  (МДж/кг) повинно призвести до зростання температури горіння.

На рисунку 1 відображено залежності питомої масової  $Q_m$  та об'ємної  $Q_v$  теплотворних здатностей, а також співвідношення H/C для нормального ряду вуглеводневих газів у залежності від їх молекулярної маси. Оскільки збільшення кількості атомів вуглецю в молекулі вуглеводневого газу різко збільшує його молекулярну масу і зменшує співвідношення H/C, то питома масова теплотворна здатність вуглеводневих енергоносіїв зменшується зі зростанням молекулярної маси. Тобто для легких вуглеводневих газів питома масова теплотворна здатність більша за величиною, ніж для важких. Об'ємна питома теплотворна здатність визначається відношенням масової питомої теплотворної здатності до густини газу, тому при збільшенні молекулярної маси вона зростає. Таким чином, температура згоряння вуглеводневих газів повинна зменшуватися зі зростанням молекулярної маси.

З іншого боку, при згорянні вуглеводневого газу в повітрі частина енергії, яка виділяється в процесі горіння, витрачається на підігрівання продуктів згоряння і надлишкового повітря. Щоб оцінити величину цих витрат енергії, проаналізуємо реакції горіння та відповідні стехіометричні співвідношення.

На рисунку 2 відображено величини чистих продуктів згоряння  $M_{сум} = M_{CO_2} + M_{H_2O}$ , а

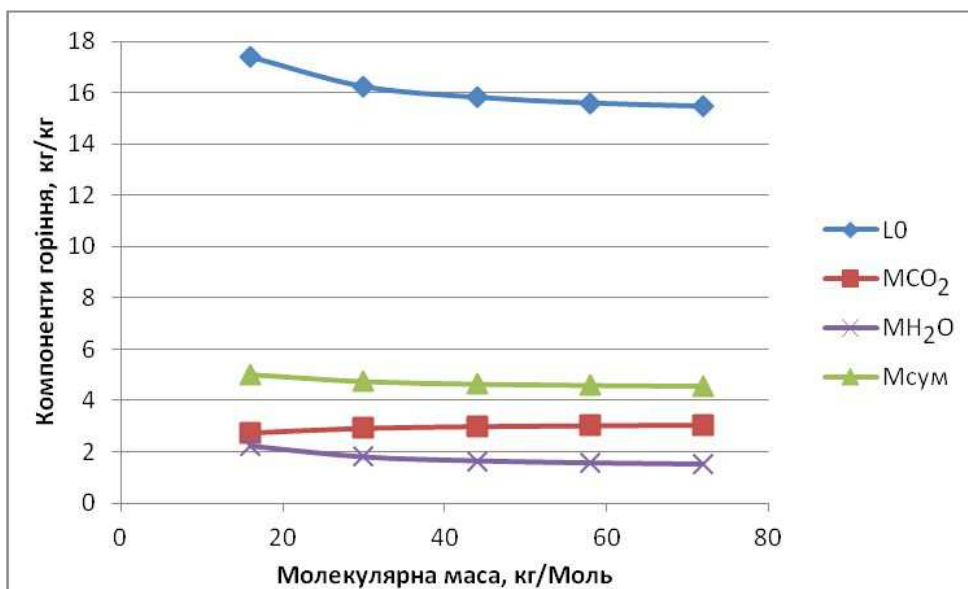


Рисунок 2 – Залежність маси компонентів процесу горіння від молекулярної маси газу

також теоретичної масової кількості повітря для одиниці маси вуглеводневих газів в залежності від їх молекулярної маси. Аналіз результатів показує, що зі збільшенням молекулярної маси вуглеводневого газу сумарна маса продуктів згоряння зменшується через зменшення теоретичної маси кисню, необхідної для повного згоряння 1 кг газу. Крім того, в продуктах згоряння частка вуглекислого газу зі збільшенням молекулярної маси енергоносія зростає, а частка водяної пари зменшується. Враховуючи, що питома масова теплоємність водяної пари при різних температурах приблизно вдвічі перевищує теплоємність вуглекислого газу та загальну тенденцію до зменшення сумарної маси продуктів згоряння, можна стверджувати, що зі збільшенням молекулярної маси горючого газу витрата енергії на підігрівання чистих продуктів згоряння зменшується.

Якщо процес горіння вуглеводневих газів відбувається в середовищі повітря, то частина отриманої енергії витрачається на підігрівання інертного азоту, що знаходиться в повітрі. За розрахунками зі зростанням молекулярної маси вуглеводневого газу теоретично необхідна кількість повітря зменшується, причому для етану в порівнянні з метаном зменшення маси теоретично необхідного повітря складає 6,67%, для бутану в порівнянні з етаном – 2,59%, для пропану порівняно з бутаном – 1,45%, для пентану порівняно з пропаном – 0,78%.

Зменшення витрати енергії на підігрівання продуктів згоряння (в тому числі і азоту) призведе до зростання температури горіння вуглеводневого газу, причому з зростанням молекулярної маси енергоносія температура горіння повинна збільшуватися.

Аналізуючи сказане, приходимо до висновку, що для легких вуглеводневих газів (метан, етан) температура горіння повинна бути високою завдяки більшим за величиною співвідношенням Н/С, а, значить, завдяки більшій теплотворній здатності енергоносія в порівнянні з

важкими вуглеводневими газами (бутан, пропан, пентан). Однак для вуглеводневих газів з більшою молекулярною масою витрати енергії на підігрівання продуктів згоряння суттєво менші, що призводить до зростання температури горіння.

Якщо процес горіння відбувається за умови надлишку повітря, що характерно для силових промислових установок (наприклад, газових турбін), то для нагрівання надлишкового повітря витрачається додаткова енергія, що призводить до пониження температури горіння.

Для кількісної оцінки впливу молекулярної маси вуглеводневого газу на температуру горіння в повітряному середовищі з врахуванням надлишку повітря проведено розрахунки температури горіння різних вуглеводневих енергоносіїв на основі отриманої залежності (13). Як відзначалося вище, прямий розрахунок за вказаною формулою не може бути реалізованим, оскільки теплоємності повітря та продуктів згоряння, що входять у (13), залежать від шуканої температури та компонентного складу робочого тіла. Тому використано ітераційний метод, суть якого викладена вище. В результаті реалізації алгоритму отримано залежності температури горіння різних вуглеводневих газів при певному надлишку повітря, які у вигляді графіків подано на рисунку 3.

Як видно з графіків, максимальна температура горіння характерна для спалювання етану, не зважаючи на те, що його масова теплотворна здатність нижча за аналогічний показник для метану. Пояснюється цей факт тим, що при згорянні метану утворюється більша кількість продуктів згоряння (завдяки більшому значенню теоретично необхідної кількості повітря для повного згоряння) і з більшою питомою масовою теплоємністю, що вимагає більшої витрати енергії. Зі збільшенням молекулярної маси енергоносія (бутан, пропан, пентан) температура горіння практично не змінюється завдяки тому, що незначне зниження питомої масової тепло-

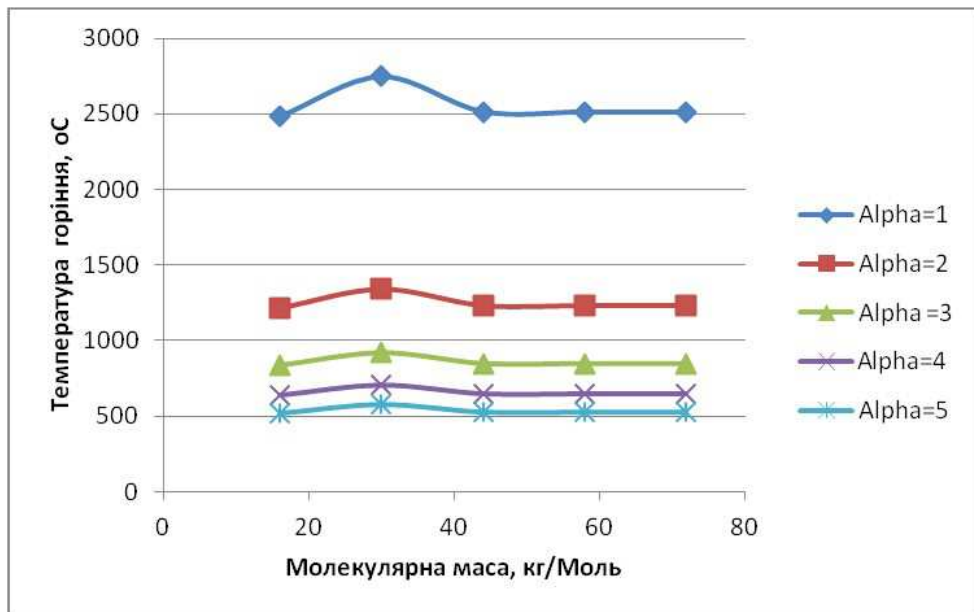


Рисунок 3 – Залежність температури горіння вуглеводневих газів від молекулярної маси та коефіцієнта надлишку повітря

творної здатності при збільшенні молекулярної маси компенсується зменшенням витрат енергії на підігрівання продуктів згорання.

Зі зростанням коефіцієнта надлишку повітря залежність температури горіння від молекулярної маси енергоносія практично нівелюється, оскільки основна частка витрати енергії має забезпечити підігрівання надлишкового повітря, а витрата енергії на підігрівання чистих продуктів згорання стає порівняно мізерною.

### Висновки

Розглянуто процес горіння вуглеводневих газів у повітряному середовищі, наведено результати досліджень впливу молекулярної маси енергоносія та коефіцієнта надлишку повітря на величину температури горіння. В результаті встановлено взаємозв'язок між температурою горіння і параметрами процесу. Показано, що максимальна температура горіння характерна для спалювання етану, незважаючи на те, що його масова теплотворна здатність нижча за аналогічний показник для метану. Встановлено, що при зростанні коефіцієнта надлишку повітря залежність температури горіння від молекулярної маси енергоносія практично нівелюється.

### Література

1 Мотало А. Оцінювання якості природного газу за його теплотворною здатністю / А. Мотало // Метрологія та вимірвальна техніка. – 2007. – Вип. 67. – С. 92–100.

2 Стадник Б. Методологія побудови системи оцінювання відповідності природного газу / Б.Стадник, В.Мотало, А.Мотало // Стандартизація, сертифікація, якість. – 2008. – №2. – С. 51–59.

3 Трубопровідний транспорт газу / М.П. Ковалко, В.Я. Грудз, В.Б. Михалків [та ін.]. – К.: АренаЕКО, 2002. – 600 с.

4 Грудз Я.В. Енергоефективність газотранспортних систем / Я.В. Грудз. – Івано-Франківськ: Лілея-НВ, 2012. – 208 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії  
05.03.18

Рекомендована до друку  
професором Грудзом В.Я.  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
д-ром техн. наук Говдяком Р.М.  
(ТзОВ «ІК Машиекспорт», м. Київ)