

УДК 536 (076)

Бут С.А., кандидат технічних наук,  
Соколенко А.І., доктор технічних наук,  
Шевченко О.Ю., доктор технічних наук

*Національний університет харчових технологій*

## ОСОБЛИВОСТІ ТРАНСФОРМАЦІЇ ЕНЕРГІЇ ПЕРШОДЖЕРЕЛ В ТЕПЛОВУ ЕНЕРГІЮ

*Виконано дослідження, яке стосувалося особливостей трансформації хімічної енергії першоджерел у формі газів гомологічного ряду. Показано доцільність використання складових енергії парової фази продуктів згорання за рахунок її конденсації.*

Енергетичні потоки і їх трансформації в процесах харчових технологій пов'язані з матеріальними потоками, які у більшості є носіями перших. При цьому енергетичний потенціал у формі хімічної енергії вхідних сировинних потоків будемо вважати технологічним і таким, максимально можливе збереження якого є важливою складовою виробництва продуктів харчування.

Хімічні і біохімічні реакції, пов'язані з трансформаціями матеріальних потоків, здійснюються з виділенням або поглинанням енергії. Звичайно така енергія має форму теплоти, а знак перетворень відповідає закону збереження у такій формі: "Якщо утворення будь-яких з'єднань супроводжується виділенням (або поглинанням) деякої кількості теплоти, то за їх розкладання в таких же умовах та ж кількість теплоти поглинається (або виділяється)" [1].

Енергетичні зміни, які супроводжують перебіг хімічних реакцій, мають в окремих умовах важливе значення. До таких випадків відноситься реакція горіння палив. Теплові ефекти реакцій прийнято відносити до одного моля утвореної речовини у формі поняття теплоти утворення певного з'єднання.

Величини теплових ефектів в термохімічних рівняннях відображуються

знаком плюс у випадках екзотермічних реакцій і знаком мінус за ендотермічних.

Термохімічні розрахунки виконуються на основі закону Гесса, який визначає, що тепловий ефект реакції залежить тільки від початкового і кінцевого стану речовини.

Значна кількість технологій харчових виробництв використовує біохімічні перетворення матеріальних потоків як в напрямках розкладання складних органічних сполук на простіші, так і у зворотному напрямку синтезу більш складних речовин. У зв'язку з цим із закону Гесса витікає ряд наслідків, врахування яких спрощує розрахунки хімічних реакцій, що відбуваються за сталих тисків ( $p = \text{const}$ ) або в сталих об'ємах ( $V = \text{const}$ ).

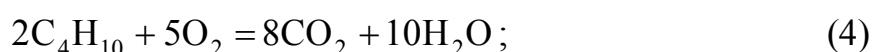
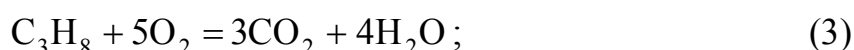
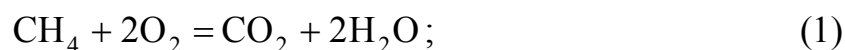
В інтересах цього дослідження відмітимо наступні з таких наслідків [2]:

- тепловий ефект реакції розкладання хімічного з'єднання чисельно дорівнює і протилежний за знаком тепловому ефекту реакції синтезу цього з'єднання з продуктів розкладання;
- різниця теплових ефектів двох реакцій, що з різних вихідних станів приводять до однакових кінцевих станів, дорівнює тепловому ефекту реакції переходу з одного початкового стану в інший. Таким чином, тепловий ефект всякої реакції дорівнює алгебраїчній сумі теплових ефектів при згоранні реагентів до однакових продуктів (для вихідних речовин ці теплові ефекти вважаються додатними, а для продуктів реакції – від'ємними);
- різниця теплових ефектів двох реакцій, що починаються з одного початкового стану до різних кінцевих станів, дорівнює тепловому ефекту реакції переходу з одного кінцевого стану в інший. Таким чином, тепловий ефект всякої реакції дорівнює алгебраїчній сумі теплових ефектів при утворенні реагентів з простих речовин (для продуктів реакції ці теплові ефекти вважаються додатними, а для вихідних речовин – від'ємними).

Форма енергії, прихована в різних речовинах, що звільняється за хімічних реакцій або за деяких фізичних процесів (наприклад, за конденсації пари в рідину або за кристалізації рідини), визначається як *внутрішня* енергія речовини.

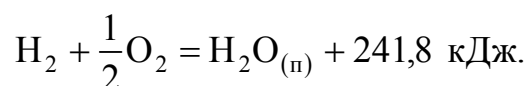
ни. Теплові ефекти таких реакцій залежать від природи вихідних речовин і продуктів реакції, їх агрегатного стану і температури. У зв'язку з цим для оцінок теплових ефектів вказують параметри, що відповідають температурі вихідних речовин і продуктів реакції при 25 °С. При цьому також передбачається, що задіяні в реакціях речовини знаходяться у такому агрегатному стані, який є стійким за вказаної температури.

У присутності кисню повітря або інших окислювачів органічні речовини підлягають горінню з повним перетворенням вуглецю і водню у їх складі у діоксид вуглецю і воду. Так спалюванню таких представників гомологічного ряду, як метан, етан, пропан і бутан відповідають реакціям:



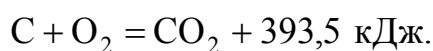
Кінцевими продуктами дихання або розкладання вуглеводнів також є діоксид вуглецю і вода. Очевидно, що в підрахунках теплових ефектів потрібно враховувати наявність (або відсутність) фазового переходу води. Це тим більш важливо у зв'язку з використанням газів, як першоджерел хімічної енергії.

Відомо, що теплота утворення “рідинної” води складає 285,8 кДж/моль. Це означає, що за утворення 18 г такої води з 2 г водню і 16 г кисню виділяється 285,8 кДж. Разом з тим, теплота утворення водяної пари дорівнює 241,8 кДж/моль, що відповідає термохімічному рівнянню

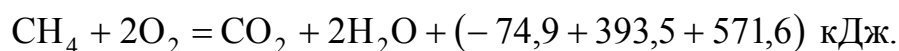


Очевидно, що різниця між теплотою утворення води (285,8 кДж/моль) і водяної пари (241,8 кДж/моль) являє собою віднесену до одного моля (18 г) теплоту випаровування води при 25 °С.

Утворенню діоксиду вуглецю відповідає рівняння



Визначимо тепловий ефект реакції окислення метану  $\text{CH}_4$  за відомої теплоти його утворення (74,9 кДж/моль) і продуктів його згорання – діоксиду вуглецю (393,5 кДж/моль) і води (285,8 кДж/моль):



У відповідності до закону Гесса маємо

$$(-74,9 + 393,5 + 571,6) = 890,2 \text{ кДж}$$

З аналізу гомологічного ряду насичених вуглеводнів витікає, що співвідношення між кількістю атомів водню і вуглецю залежить від положення їх в ньому, оскільки складу кожного з членів відповідає залежність  $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ , де  $n$  – число атомів вуглецю.

Спалювання природних газів в якості первинних енергоносіїв є характерним для сучасних підприємств харчової промисловості і воно супроводжується, як бачимо, утворенням діоксиду вуглецю і водяної пари, оскільки температури одержуваної суміші суттєво більші за 100 °С. Це означає, що саме така парогазова суміш скидається в навколишнє середовище, а рівень енергетичних втрат оцінюється її теплоємністю.

Важливою складовою останньої при цьому є частка, яка стосується теплоти пароутворення води і може бути повернута на технологічні потреби за рахунок конденсації водяної пари.

Залежності (1)–(4) дають матеріальні співвідношення компонентів, що приймають участь у реакціях і на їх основі виконано підрахунки по визначенню кількості утворюваної водяної пари і теплоти конденсації останньої (таблиця).

З метою оцінки впливу факторів дані таблиці представлено у вигляді графічної залежності на рис. 1.

З наведених міркувань приходимо до висновку про те, що за умови однакових масових витрат газів зменшення їх молекулярної маси приводить до зростання кількості утворюваної водяної пари і перспективи збільшення рекуперативного повернення теплоти конденсації водяної пари.

Повернувшись до загальної формули гомологічного ряду  $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ ,

підкреслимо, що співвідношення кількості атомів Н/С змінюється від  $C/H = 4$  до асимптотичного наближення  $C/H = 2$ . Це означає доцільність оцінки енергетичних потенціалів і для інших складових гомологічного ряду вуглеводнів.

**Таблиця. Співвідношення матеріальних і енергетичних показників**

| Параметр системи                              | Г а з        |               |                 |                   |
|---|--------------|---------------|-----------------|-------------------|
|   | Метан $CH_4$ | Етан $C_2H_6$ | Пропан $C_3H_8$ | Бутан $C_4H_{10}$ |
| Молекулярна маса                              | 16           | 30            | 44              | 58                |
| Співвідношення атомів Н/С                     | 4            | 3             | 2,67            | 2,5               |
| Кількість $H_2O$ при спалюванні 1 кг газу, кг | 2,25         | 1,8           | 1,636           | 1,552             |
| Теплота конденсації $H_2O$ , кДж              | 5081,4       | 4065,14       | 3694,8          | 3505              |

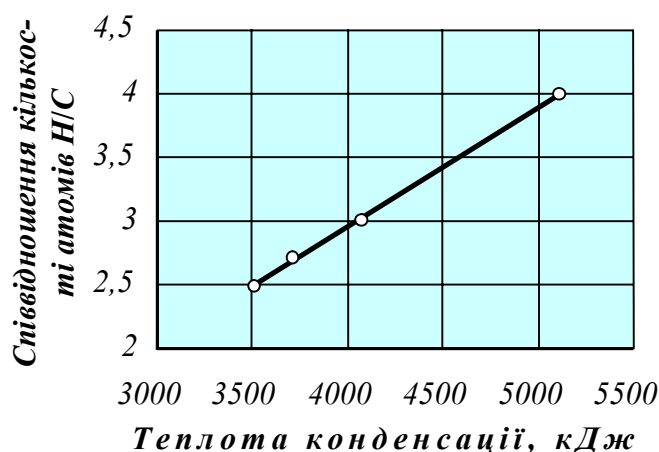


Рис. 1. Залежність між співвідношенням кількості атомів водню і вуглецю у газі та теплою конденсації водяної пари при спалюванні 1 кг газу

Очевидно, що доцільність пошуків і оцінки перспектив рекуперативного повернення теплоти конденсації можливо здійснити у порівнянні одержаних результатів з теплотворною здатністю газів. За наведеним значенням теоретичного показника цієї величини для метану 890,2 кДж/моль перерахунок на 1 кг його маси приводить до значення 55108 кДж. Однак теплотворна здатність за довідковими даними [2] є дещо меншою і становить для метану 49800 кДж/кг, для пропану – 46400 і для етану – 47500 кДж/кг. Це означає, що рекуперативне повернення енергії наближається до 10 % від загального показника.

Продукти згорання газів у вигляді суміші  $\text{CO}_2$  і  $\text{H}_2\text{O}$  як матеріальні потоки одночасно виконують роль енергетичних потоків. Ефективність використання потенціалу останніх залежить від організації теплопередавання іншим матеріальних потокам і термодинамічних параметрів таких процесів.

З точки зору інтересів якомога повнішого використання теплового потенціалу продуктів згорання доцільно мати максимально більшу різницю початкової і кінцевої температур. Максимальне значення початкової температури  $t_{(п)max}$  може обмежуватися температурою горіння, термічною міцністю поверхні теплопередавання, кількістю повітря, що подається на забезпечення горіння тощо. Разом з тим кінцева температура  $t_{(кін)min}$  обмежується знизу, оскільки вона має перевищувати температуру, наприклад, генерування водяної пари в парогенераторі. При цьому очевидно, що має виконуватися умова

$$t_{(кін)min} > 100 \text{ }^\circ\text{C},$$

якщо генерування пари здійснюється за тисків більших за атмосферний.

Оскільки тиск в камері горіння близький до атмосферного, то це означає неможливість конденсації в ній водяної пари, як складової газової суміші.

Саме у зв'язку з відміченим поглиблене використання енергетичного потенціалу потоку досягається його спрямуванням у економайзери та підігрівачі повітря. Завданням останніх є підвищення температури повітря, що забезпечує ефективне спалювання вхідного потоку газу.

Разом з тим існує ще одна причина обмеження нижнього значення величини  $t_{(кін)min}$ . Вона пов'язана зі складом палива і наявністю в ньому таких хімічно активних елементів, як сірка та фосфор. За конденсації водяної пари в газоходах та витяжній трубі в таких умовах утворюються відповідні кислоти, що приводить до швидкого руйнування їх футеровки. Це означає, що вилучення теплоти конденсації з вихідного потоку повинно здійснюватися в спеціальному обладнанні. Таким обладнанням може бути економайзер або підігрівач повітря.

З точки зору інтересів стабільності рекуперативних режимів повернення теплоти конденсації за краще слід вважати використання підігрівача повітря. Таке твердження витікає з аналізу схеми матеріальних потоків у цій системі

(рис. 2) і пов'язане з тим, що потоки повітря і газу (та суміші продуктів згорання) повинні бути максимально синхронізованими.

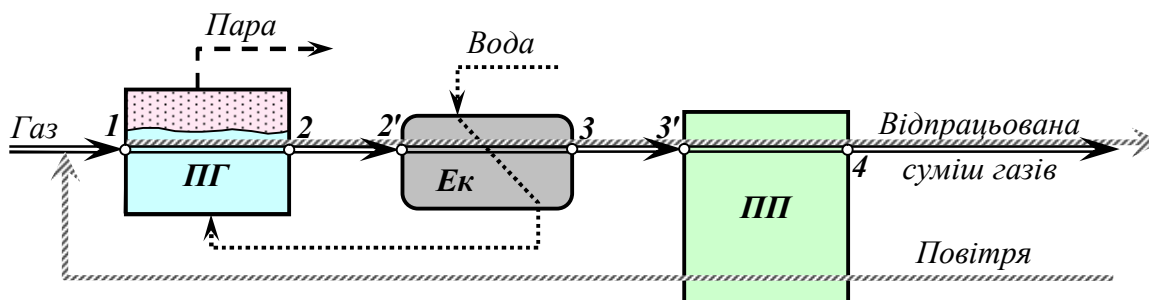


Рис. 2. Схема матеріальних потоків: ПГ – парогенератор; Ек – економайзер; ПП – підігрівач повітря

Однак з точки хору термодинамічної доцільності вхідний потік повітря за показником температури на вході в камеру згорання бажано мати якомога більш наближеним до температури горіння.

Використання регенерації для підігрівання живильної води забезпечує підвищення термічного ККД циклу на 10–12 % і при збільшенні початкових параметрів пари ефект зростає. Регенеративне підігрівання води зменшує не оберненість процесу передавання теплоти в парогенераторі.

На схемі тракт переміщення парогазової суміші розбито на окремі ділянки. Ділянка 1–2 відповідає парогенератору і за масового потоку парогазової суміші  $m_{\text{пгс}}$  і її теплоємності  $c_{\text{пгс}}$  теоретичний коефіцієнт корисної дії складе

$$\eta_{\text{пг}} = \frac{c_{\text{пгс}} m_{\text{пгс}} T_1 - c_{\text{пгс}} m_{\text{пгс}} T_2}{c_{\text{пгс}} m_{\text{пгс}} T_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}, \quad (5)$$

де  $T_1$  та  $T_2$  – відповідно абсолютні температури потоку парогазової суміші в точках 1 та 2.

Аналогічно для економайзера і підігрівача повітря запишемо:

$$\eta_{\text{ек}}^{\text{T}} = \frac{T_{2'} - T_3}{T_{2'}}; \quad (6)$$

$$\eta_{\text{пп}}^{\text{T}} = \frac{T_{3'} - T_4}{T_{3'}}. \quad (7)$$

Для системи в цілому загальний ККД визначається залежністю:

$$\eta_{\text{заг}}^{\text{T}} = \frac{T_1 - T_4}{T_1}. \quad (8)$$

Оскільки наявність конденсатора в системі температуру  $T_4$  вихідного потоку знижує, то саме це забезпечує підвищення загального ККД.

Схема матеріальних потоків з рис. 2 у своїй первинній частині відображує відкриту систему, надбудовою якої є контур парової фази. Останній в залежності від його виконання у свою чергу може бути закритим або відкритим в цілому або в окремих частинах на рівні окремих (локальних) зон енергокористування. Характерною ознакою закритих локальних зон є наявність конденсаторів, які забезпечують повернення конденсату у парогенератор. При цьому такі конденсатори слід оцінювати на рівні додаткових пристроїв, що забезпечують неможливість потрапляння пари у зворотну магістраль і оптимальний теплообмін в режимі фазового переходу на основній тепло передавальній поверхні.

Повернувшись до даних таблиці і з врахуванням результатів аналізу структури системи, відмітимо, що на кінцевий результат по збільшенню ефективності системи буде впливати вибір палива з гомологічного ряду вуглеводнів.

При цьому головний висновок цих досліджень має вид:

- за наявності конденсатора парової фази парогазової суміші найефективнішим буде спалювання *метану*;
- за відсутності конденсатора парової фази з парогазової суміші найменші енергетичні витрати будуть при споживанні в якості палива *бутану*.

## Література

1. Глинка Н.Л. Общая химия. Л.: Химия. – 1984. – 704 с.
2. Итинская Н.И., Кузнецов Н.А. Топливо, масла и технические жидкости. М.: ВО Агропромиздат. – 1989. – 304 с.