

УДК 662.767+662.614

О.І. Брунеткін, канд. техн. наук, доц.,

А.В. Гусак, магістр

Одеський національний політехнічний університет, пр. Шевченка, 1, 65044 Одеса, Україна; e-mail: alexbrun@rambler.ru

ВИЗНАЧЕННЯ ДІАПАЗОНУ ЗМІНИ КОНВЕКТИВНОГО КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛОВІДДАЧІ ПРИ СПАЛЮВАННІ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ВИДІВ ГАЗОПОДІБНОГО ПАЛЬНОГО

О.І. Брунеткін, А.В. Гусак. **Визначення діапазону зміни конвективного коефіцієнта тепловіддачі при спалюванні альтернативних видів газоподібного пального.** У статті виокремлено причину, яка ускладнює використання на встановленому обладнанні альтернативних горючих газів, а саме — організація керованого ефективного процесу їх спалювання. Одним з параметрів, що впливають на динамічні характеристики об'єкта управління, розглянуто коефіцієнт конвективного теплообміну. Визначено вплив на нього зміни теплофізичних характеристик і швидкості продуктів згоряння, що виникають через використання різних горючих газів. Визначено, що головною причиною зміни коефіцієнта тепловіддачі є наявність в суміші спалюваних горючих газів окисів вуглецю і водню.

Ключові слова: альтернативне газоподібне пальне, коефіцієнт конвективного теплообміну, критерій Прандтля, критерій Рейнольдса, кінематична в'язкість.

O.I. Brunetkin, A.V. Gusak. **Determining the range of variation of convective heat transfer coefficient during the combustion of alternative kinds of gaseous fuels.** The article highlights the reason of complication of usage of alternative fuel gases on the installed equipment — the organization of effective process of their combustion. As one of the parameters affecting the dynamic characteristics of the control object, the coefficient of convective heat transfer is considered. The effect of changes of physical characteristics of heat and rate of combustion products arising from the use of various combustible gases on it is determined. It is found that the main cause of the change of heat transfer coefficient is the presence of flammable gases of carbon monoxide and hydrogen in the mixture.

Keywords: alternative gaseous fuels, convective heat transfer coefficient, Prandtl number, Reynolds number, kinematic viscosity.

Вступ. В енергетиці і промисловості вибір виду використовуваного пального для здійснення запланованих технологічних процесів в більшості випадків визначається вартістю енергії, що одержується при його спалюванні. При цьому витрати загалом складаються з двох частин:

- вартості видобутку і транспортування пального до місця використання, $C_{\text{вид}}$;
- вартості організації процесу спалювання, $C_{\text{сп}}$.

При цьому природно витрати намагаються мінімізувати

$$C = C_{\text{вид}} + C_{\text{сп}} \rightarrow \min. \quad (1)$$

За першою складовою (1) $C_{\text{вид}}$ пальне в свою чергу можна розділити на дві групи:

- традиційне, що спеціально видобуваються у вигляді корисних копалин з певною вартістю видобутку і транспортування;
- альтернативне, що утворюються в процесі виконання основних технологічних процесів (гази, що утворюються при нафтопереробці; доменні гази і гази коксохімічного виробництва; гази, одержувані при дегазації і вентиляції шахт і т.д.).

Друга група пального найчастіше характеризується нульовою складовою $C_{\text{вид}}$, оскільки вони не потребують витрат по видобутку і отримуються за місцем потенційного їх використан-

DOI 10.15276/opus.2.46.2015.15

© 2015 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

ня. Більше того, зазначене пальне може мати негативну величиною $C_{\text{вид}}$, зумовлену необхідністю витрат на його утилізацію. Іншими словами при їх спалюванні з метою отримання енергії можна отримати додатковий дохід за рахунок економії коштів на утилізацію. А витрати на утилізацію існують і можуть бути значними. Зазначене справедливе для багатьох підприємств коксохімічного виробництва, металургії (доменне виробництво), нафтопереробки, в яких для вирішення екологічних завдань спалюються (утилізуються) утворюючі вторинні горючі гази. При таких, здавалося б сприятливих умовах, причиною їх невикористання є велика величина другої складової у вартості одержуваної енергії — $C_{\text{сп}}$. Причому мова йде не стільки про отримання самої енергії (спалюються ж ці гази в свічках), скільки про її якість. При використанні традиційних видів пального процес спалювання організується для відомого і постійного його складу. Альтернативні ж види пального, на противагу, характеризуються нестабільністю і найчастіше невідомим складом, що і заважає організації ефективного процесу його спалювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Підвищення вартості видобутку і транспортування традиційних видів пального активізувало спроби використання альтернативних його видів. На подолання зазначених труднощів зараз направлено ряд робіт. В [1, 2] запропоновано метод оперативного визначення складу газоподібного пального в процесі його спалювання. Але використання пального навіть відомого, але змінного кількісного складу, призводить до виникнення проблем при його подачі в енергетичне обладнання. Проблеми виникають і через зміну теплофізичних параметрів продуктів згоряння, що впливають на динамічні характеристики енергетичного обладнання.

Для пального в газоподібному стані кількість, що подається на спалювання, визначається об'ємною витратою. При установці устаткування, розрахованого на використання певного газу, найчастіше метану, під нього розраховується і геометрія підвідних газопроводів і прохідного перетину пальників. Наявність у складі альтернативного пального насичених і ненасичених вуглеводнів підвищує нижчу теплоту згоряння Q_{H} газової суміші, приведену до одиниці його об'єму, у порівнянні з метаном. При цьому проблем, пов'язаних з пропускнуною спроможністю обладнання, не виникає: для забезпечення встановленого теплового навантаження потрібна менша об'ємна витрата пального, ніж для метану. Так, при використанні пропану замість метану при виділенні однакової кількості теплової енергії витрата газу становить лиш частку від пропускнуною спроможності системи подачі газу (див. таблицю)

$$K_{\text{C}_3\text{H}_8} = Q_{\text{H}}(\text{CH}_4) / Q_{\text{H}}(\text{C}_3\text{H}_8) = 35,83 / 91,27 \approx 0,4. \quad (2)$$

Інша картина спостерігається при наявності в альтернативному пальному чадного газу CO і водню H_2 . Ці складові можуть бути присутніми в значній кількості [3]. Так, використання чадного газу замість метану при однакових їх об'ємних витратах (з огляду на обмеження пропускнуною спроможності обладнання) через меншу теплотворну спроможність (див. таблицю) зможе задовольнити і меншу теплотворну навантаженість у

$$K_{\text{CO}} = Q_{\text{H}}(\text{CH}_4) / Q_{\text{H}}(\text{CO}) = 35,83 / 12,63 \approx 2,8 \quad (3)$$

разів. Для водню така величина складає

$$K_{\text{H}_2} = Q_{\text{H}}(\text{CH}_4) / Q_{\text{H}}(\text{H}_2) = 35,83 / 10,78 \approx 3,3 \quad (4)$$

разів. Звичайно ж альтернативні види газоподібного пального не складаються тільки з чадного газу або водню, але, як вже зазначалося, ці гази можуть становити значну його частину. Тому величини із співвідношень (3) і (4) можна використовувати як граничну оцінку.

Проблема забезпечення заданого теплового навантаження при використанні альтернативного газоподібного пального з меншою теплотворною здатністю розглянута в [3]. У цій роботі запропоновано рішення шляхом включення додаткового обладнання і управління отриманою розширеною системою.

Нижча теплота згорання горючих газів (теплотворна спроможність)

Компонент	Нижча теплота згорання Q_H , МДж/м ³
Метан (CH ₄)	35,83
Пропан (C ₃ H ₈)	91,27
Етилен (C ₂ H ₄)	59,08
Ацетилен (C ₂ H ₂)	56,04
Оксид вуглецю (CO)	12,63
Водень (H ₂)	10,78

Мета дослідження. Зміна витрати пального позначиться на витратах газоподібних продуктів і динаміці тепломасообмінних процесів всередині топок і камер згорання теплоенергетичного обладнання. При використанні традиційних видів пального його витрати і параметри продуктів згорання можуть змінитися. Ці зміни обмежені і визначаються зміною навантаження. У випадку ж використання альтернативних видів пального, зміни можуть відбуватися в більш широкому діапазоні параметрів. Вони визначаються не тільки зміною навантаження, але і зміною властивості пального, а також спільною дією цих збурень. Причому зміна складу пального може відбуватися частіше зміни навантаження. При цьому для отримання енергії із заданими характеристиками (якості енергії) зростає роль управління обладнанням на перехідних режимах. Підвищення якості управління вимагає знання динамічних характеристик продуктів згорання в розглянутих режимах. До них в першу чергу можна віднести коефіцієнт тепловіддачі продуктів згорання. Метою дослідження є проведення оцінки можливого діапазону змін цієї величини.

Викладення основного матеріалу. В стандартному випадку котел розрахований на спалювання метану. Всі оцінки проведемо у вигляді відхилень від стандартного стану. Як граничні випадки розглянемо використання в якості пального пропану (насиченого вуглеводню), чадного газу і водню. У реальній ситуації альтернативне палне складається з суміші цих і подібних їм газів. Параметри суміші матимуть також проміжне значення. Покладемо, що:

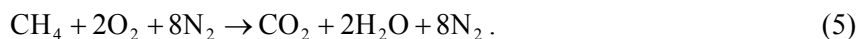
— для метану стандартним станом з точки зору його подачі є номінальний режим (номінальна потужність котла). Для пропану, що має більшу величину нижчої теплоти згорання, ніж метан (див. таблицю), об'ємна витрата є меншою і визначається забезпеченням такої теплової потужності, що дорівнює номінальній потужності для метану. Для чадного газу і водню, що мають меншу теплотворну спроможність, ніж метан, об'ємна витрата приймається такою, що дорівнює номінальній витраті метану, як максимально можливій для наявної геометрії підвідних газопроводів.

— окислювачем виступає повітря. До складу повітря входить 20 % кисню O₂ і 80 % азоту N₂. Для кількості кисню значення округлене (замість 21 %) з метою спрощення ілюстраційних розрахунків. Решта газів, що входять до складу повітря (вуглекислий газ, аргон та ін.) не беруть участь у процесі горіння і включені в кількість баластного азоту.

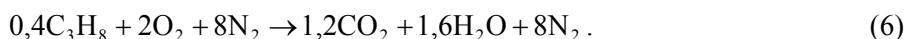
— горіння відбувається при стехіометричному співвідношенні (коефіцієнт надлишку окислювача $\alpha = 1$). У процесі горіння відбувається повне окислювання продуктів спалювання – вуглекислого газу CO₂ і водної пари H₂O. Утворення інших газів не враховується через їх відносно малу кількість.

Запишемо реакції горіння зазначених газів для прийнятих умов. Азот присутній як баластний газ і присутній в реакціях для оцінки об'єму димових газів, що утворюються.

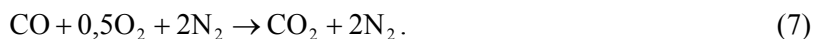
Для метану



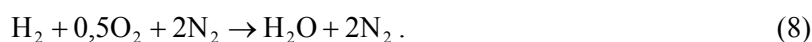
Для пропану з врахуванням (2) при забезпеченні однакового з метаном тепловиділення



Для чадного газу при його об'ємній витраті, рівній витраті метану



Для водню при його об'ємній витраті, рівній витраті метану



Порівняння виразів для реакції горіння метану (5) і пропану (6) показує, що при однаковому тепловиділенні склад димових газів близький і їх витрати

$$\frac{\dot{V}_{\text{CH}_4}}{\dot{V}_{\text{C}_3\text{H}_8}} = \frac{11}{10,8} \approx 1,02,$$

де \dot{V}_{CH_4} , $\dot{V}_{\text{C}_3\text{H}_8}$ — об'ємні витрати метану і пропану, відповідно, пропорційні їх мольним витратам.

Інша картина спостерігається при порівнянні реакцій горіння метану з реакціями горіння кисню вуглецю (7) і водню (8). При однакових їх об'ємних витратах на вході об'ємні витрати продуктів згорання для кисню вуглецю в

$$\frac{\dot{V}_{\text{CH}_4}}{\dot{V}_{\text{CO}}} = \frac{11}{3} \approx 3,7 \quad (9)$$

разів і для водню в

$$\frac{\dot{V}_{\text{CH}_4}}{\dot{V}_{\text{H}_2}} = \frac{11}{3} \approx 3,7 \quad (10)$$

разів менше, ніж для метану. В цих формулах \dot{V}_{CO} , \dot{V}_{H_2} — об'ємні витрати кисню вуглецю і водню, відповідно, пропорційні їх мольним витратам згідно з (7) і (8).

В технічній літературі загальноприйнятою формою для визначення коефіцієнта тепловіддачі конвекцією від газу (продуктів згорання) до різних теплообмінних поверхонь є критеріальне рівняння

$$\alpha_k = C \cdot \text{Re}^{n_1} \cdot \text{Pr}^{n_2}, \quad (11)$$

де Re — критерій Рейнольдса;

Pr — критерій Прандтля.

Коефіцієнт C може змінюватися для різного виду теплообмінних поверхонь і способу їх обтікання газовим потоком, але для обраного обладнання залишається постійною величиною. Показник ступеня n_1 також може змінюватися за тих самих умов, що і коефіцієнт C , але знаходиться у вузькому діапазоні. Так в [4] для котельного обладнання величина n_1 не виходить за межі інтервалу

$$0,6 \leq n_1 \leq 0,75. \quad (12)$$

Величина n_2 , як правило, приймається за сталу і в [4]

$$n_2 = 0,33. \quad (13)$$

В роботі [5] розглядаються фактори, які можуть вплинути на точність розрахунків α_k . Але і в цьому випадку форма рівняння залишається аналоюною, як приведено в (11). Зміни відносяться тільки до показників ступеня n_1 і n_2 . Тому пропонується прийняти $n_1 = 0,707$, що не виходить за межі діапазону (12). Величину ж n_2 пропонується збільшити в порівнянні з (13) практично в 2 рази і прийняти $n_2 = 0,647$. При цьому вона все ж залишається меншою за 1.

Результати. Проаналізуємо характер змін і оцінимо величину коефіцієнта α_k згідно з (11) при спалюванні на встановленому обладнанні альтернативних горючих газів замість метану.

Почнемо з критерію Pr . У всіх випадках $\text{Pr} < 1$ та приблизно однаковий, оскільки продукти згорання газоподібні. Так, для температури ~ 1400 К, характерної для виходу із топки, для усередненого складу продуктів згорання метану (об'ємні частки парів води і вуглекислого газу

відповідно $r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,11$, $r_{\text{CO}_2} = 0,13$, решта — азот) $\text{Pr} = 0,54$ [4]. Зменшення частки парів води в продуктах згоряння до нуля, що відповідає спалюванню окису вуглецю, веде до зменшення величини критерію всього на 5 %. Збільшення частки парів води до $r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,3$, що відповідає спалюванню водню, веде до збільшення критерію Pr в порівнянні з базовим значенням на 10 % [4]. Узагальнюючи сказане, величину критерію Pr можна визначити в діапазоні

$$(0,95\dots 1,1) \cdot \text{Pr}_{\text{CH}_4} . \quad (14)$$

Оцінимо можливу зміну другого співмножника в (11), пов'язаного з критерієм $\text{Re} = (v \cdot d) / \nu$. Визначимо вплив кожного із співмножників, які входять до його складу.

Характерний розмір d , залишаючись величиною постійною для обраної геометрії обладнання, не впливає на зміну Re при зміні складу продуктів згоряння. Маючи температуру на виході із топки ~ 1400 К кінетична в'язкість ν продуктів згорання при зменшенні в них об'ємної частки парів води до $r_{\text{H}_2\text{O}} = 0$ зменшується на 5...7 % в порівнянні з метаном [4]. При збільшенні частки парів води до $r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,3$ в'язкість збільшується на 5%. Отже, величина кінематичної в'язкості знаходиться в діапазоні

$$(0,93\dots 1,05) \cdot \nu_{\text{CH}_4} , \quad (15)$$

де ν_{CH_4} — кінематична в'язкість продуктів згоряння при спалюванні метану в стандартних умовах.

Межі виділених діапазонів (14) і (15) є граничними випадками при спалюванні окису вуглецю і водню. У всіх реальних варіантах суміші альтернативних горючих газів відмічені величини знаходяться в середині цих діапазонів.

Розглянемо ступінь впливу зміни складу альтернативного горючого газу на швидкість протікання його продуктів згоряння і, як наслідок, на зміну критерію Рейнольдса. У відповідності з (9) і (10) в граничних випадках (спалювання CO або H_2) об'єм продуктів згоряння в порівнянні з випадком спалювання метану зменшується в 3,7 рази. При заданій геометрії теплоенергетичного обладнання це призводить до зниження швидкості потоку в ті ж 3,7 рази.

Таким чином, на зміну значення конвективного коефіцієнта тепловіддачі впливають зміна швидкості продуктів згоряння і їх теплофізичні властивості. Зміна властивостей проявляється через зміну критерію Прандтля як узагальненої характеристики і зміна кінематичної в'язкості, що враховується в критерії Рейнольдса. Приймаючи до уваги можливий діапазон зміни Pr (14), кінематичної в'язкості (15) і швидкості продуктів згоряння, у відповідності з (11) діапазон зміни конвективного коефіцієнта тепловіддачі можна обмежити величиною

$$(0,34\dots 1) \cdot \alpha_{\text{CH}_4} ,$$

де α_{CH_4} — конвективний коефіцієнт тепловіддачі при спалюванні метану в стандартному випадку.

Висновки.

1. Спалювання альтернативних видів пального в теплоенергетичному обладнанні, розрахованому на застосування стандартного пального (метану), може супроводжуватися вагомими змінами конвективного коефіцієнта тепловіддачі.

2. Головною причиною зміни коефіцієнта тепловіддачі є наявність в суміші спалюваних горючих газів окису вуглецю і водню.

3. В розглянутих умовах зміна теплофізичних властивостей продуктів згоряння не є значною. З урахуванням приблизного характеру розрахункового виразу (10) їх впливом можна знехтувати.

4. Основний вклад в зміну коефіцієнта тепловіддачі вносить зміна (зменшення) кількості і, відповідно, швидкості продуктів згоряння. Збільшення подачі суміші горючих газів для збільшення кількості продуктів згоряння лімітується пропускнуною спроможністю підвідних газопроводів і пальників встановленого обладнання.

Література

1. Максимов, М.В. Модель и метод определения условной формулы углеводородного топлива при сжигании / М.В. Максимов, А.И. Брунеткин, А.В. Бондаренко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2013. — № 6/8 (66). — С. 20 — 27.
2. Брунеткін, О.І. Ідентифікація кількісного складу невідомого газоподібного пального та його продуктів згоряння на основі вимірювання технологічних параметрів процесу спалювання палива / О.І. Брунеткін, М.В. Максимов, А.В. Бондаренко // Вісн. НТУ «ХПІ». Сер.: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. — 2014. — № 12(1055). — С. 131 — 141.
3. Математическая модель сжигания несертифицированных видов топлива / М.В. Максимов, В.Ф. Ложечников, Т.С. Добровольская, А.В. Бондаренко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2014. — № 2/8 (68). — С. 44 — 51.
4. Тепловой расчет котлов (нормативный метод). — 3-е изд., перераб. и доп. — СПб.: НПО ЦКТИ, 1998. — 256 с.
5. К вопросу об оценке влияния теплофизических характеристик теплоносителя на теплоотдачу / О.Б. Анипко, В.Ф. Климов, Л.К.-А. Магерамов, А.Н. Колбасов // Интегровані технології та енергозбереження. — 2009. — № 2. — С. 14 — 16.

References

1. Maksimov, M., Brunetkin, A. and Bondarenko, A. (2013). Model and method for determining conditional formula of hydrocarbon fuel during combustion. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(8), 20-27.
2. Brunetkin, A.I., Maksimov, M.V. and Bondarenko, A.V. (2014). The identification of the quantitative composition of unknown gaseous fuel and its combustion products using the measured technological parameters of the fuel combustion process. *Bulletin of National Technical University "KhPI": Power and Heat Engineering Processes and Equipment*, 12, 131-141.
3. Maksimov, M., Lozhechnikov, V., Dobrovolskaya, T. and Bondarenko, A. (2014). The mathematical model of non-certified fuel combustion. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(8), 44-51.
4. JSC "NPO CKTI". (1998). *Thermal Design of Boilers (Standard Method)* (3rd Ed.). Saint-Petersburg: Author.
5. Anipko, O.B., Klimov, V.F., Mageramov, L.K.-A. and Kolbasov, O.M. (2009). On the problem of thermophysical characteristics influence estimation on heat transfer. *Integrated Technologies and Energy Conservation*, 2, 14-16.

Надійшла до редакції 20 березня 2015 р.