

УДК 662.7

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.1/17>

Брунеткін В.О.

Національний університет «Одеська політехніка»

Давидов В.О.

Національний університет «Одеська політехніка»

Тельніс Р.Ф.

Національний університет «Одеська політехніка»

Жанько К.О.

Національний університет «Одеська політехніка»

МЕТОД МІНІМІЗАЦІЇ ВТРАТИ З ДИМОВИМИ ГАЗАМИ ШЛЯХОМ УПРАВЛІННЯ ЇХ КІЛЬКІСТЮ ПРИ ЗМІННОМУ НАВАНТАЖЕННІ КОТЛА

Розглянуто способи, що дозволяють збільшити ефективність роботи та зменшити викиди парникової частини вуглекислого газу котлами, які використовують як паливо природний газ. Актуальність такого дослідження обумовлена плануванням промислово розвинених країн тривалий час використати цей вид викопного палива. Такий намір підтверджується включенням Європейської комісією природного газу до «Зеленої таксономії ЄС» та укладання провідними європейськими компаніями тривалих договорів на постачання зрідженого газу. Відповідно до договорів газ постачатиметься і після 2050 року.

Максимальної економії можна досягти за рахунок зниження втрат з димовими газами, особливо при максимальних навантаженнях. Запропоновано метод збереження обсягу димових газів близьким до постійного при різному навантаженні казана за рахунок використання суміші горючих газів змінного складу. Така реалізація процесу може дозволити зберігати на рівні близькому до постійної температури димових газів і, відповідно, зменшити супутні втрати.

Висунуте припущення підтверджено результатами перевірочних теплових розрахунків котла КВ-ГМ-4.65 для різного навантаження. Розрахунки виконані на основі нормативного методу на прикладі суміші метану та доменного газу змінного складу.

Для вибору допоміжного газу, що дозволяє в суміші з метаном реалізувати такий сценарій, запропоновано використовувати параметр ω , що визначає обсяг димових газів на одиницю його теплотворної здатності. Вибір газу здійснюється шляхом порівняння цього параметра з відповідною величиною метану.

Запропоновано застосування газогенераторного газу як допоміжного як найбільш раціональний. На прикладі результатів розрахунку складу продуктів газифікації відходів деревини сосни показано можливість регулювання їх складу та теплотворної здатності. Як фактори, що впливають на склад продуктів газифікації, розглянуті коефіцієнт надлишку окислювача, вологість деревини, частка рекуперативної енергії у формі тепла від газів, що утворилися в зону реакції. Кількість окислювача вибиралося з урахуванням повної газифікації вихідної сировини.

Ключові слова: зменшення втрат, об'єм димових газів, керування температурою димових газів, допоміжні гази.

Постановка проблеми. Економічно розвинені країни відповідно до Паризької угоди [1] декларують прагнення до 2050 скоротити до нуля всі сукупні викиди CO₂ як одного з парникових газів, що не відносяться до харчової індустрії. Але практика експлуатації промислових об'єктів свідчить про малоімовірність досягнення такої мети. На тлі цього Європейською комісією прийнято рішення про включення одного з видів викопного палива – природного газу (NG) – до «Зеленої таксономії ЄС» [2]. Як наслідок, будь-який вид діяль-

ності з використанням NG класифікуватиметься як екологічно стійкий, незважаючи на проблеми з викидами вуглекислого газу, що утворюються при його спалюванні.

Планування тривалого використання газоподібного палива (після 2050 року) підтверджується і укладанням довгострокових контрактів на постачання зрідженого газу провідними європейськими фірмами. Так Shell (Нідерланди – Англія) та TotalEnergies (Франція) підписали контракти з Катаром на щорічне отримання спільно

7 млн. тонн зрідженого газу на протязі 27 років, починаючи з 2026 року [3].

Наведені факти свідчать про неминучість протягом тривалого часу використання газу в промисловості та енергетиці. Але відповідно до Паризької угоди [1] не втрачає актуальності завдання зменшення викидів парникової частки CO_2 .

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним із основних напрямків у зниженні викидів CO_2 є розвиток відновлюваних джерел енергії. Країни Євросоюзу прагнуть активно сприяти переходу до стійких джерел енергії. Однак незважаючи на значне зростання їх встановленої потужності, деякі з країн стикаються з імпортом електроенергії, що збільшується. Зокрема, 2022 року в Німеччині частка електроенергії, виробленої з відновлюваних джерел, досягла 48,4%. Тим не менш, країна, яка раніше була експортером електроенергії, тепер стала її нетто імпортером [4]. Цей факт можна трактувати як сигнал можливого дефіциту потужності для управління потоками (диспетчеризації) електроенергії всередині Євросоюзу, незважаючи на значну встановлену потужність у галузі електрогенерації із відновлюваних джерел. Обладнання, що використовує газоподібне паливо, є одним з пріоритетних у забезпеченні диспетчеризації енергопотоків. Оптимізація параметрів процесів, що протікають у такому обладнанні, може зменшити викиди парникової частини CO_2 за рахунок економії викопного газу.

Основна частина втрат під час роботи котлів посідає димові гази. Зниження їхньої температури потенційно може дати максимальний приріст коефіцієнта корисної дії (ККД) і, відповідно, зниження викидів CO_2 . На даний момент конструкція котельного обладнання має високий ступінь досконалості і не дозволяє суттєво збільшити ККД без зміни характеру процесів, що протікають.

Використання конденсаційних котлів є одним з перспективних напрямків. Ефективність цієї технології може бути додатково підвищена шляхом введення в горючі гази водню. Цей підхід з одного боку знижує частку вуглецевих газів у вихідному паливі, що призводить до зменшення викидів CO_2 . З іншого боку, збільшується вміст вологи в димових газах, що сприятливо впливає на ККД системи. Однак у [5] зазначено, що додавання безпечної кількості водню (20%) може зменшити ККД котла на 4.7%. Це зменшує перевагу використання конденсаційної технології.

Більшість конденсаційних котлів встановлюються у приватних будинках та невеликих

котельнях. Це пояснюється складністю утилізації конденсату для котлів великої потужності та додатковими витратами на його нейтралізацію. У [6] наголошується економія палива до 17,5% при використанні конденсаційних котлів у реальних умовах експлуатації. Тим не менш, вказується, що перехід від традиційного котла до конденсаційного може бути економічно непривабливим, оскільки термін окупності близький до середнього терміну служби котла або навіть перевищує його.

Промислове енергообладнання середньої та великої потужності, що використовує газоподібне паливо, в основному функціонує у безконденсатному режимі. Зміна навантаження газового котла призводить до зміни температури відпрацьованих газів. Необхідність зміни потужності котла в діапазоні від 40% до 100% може спричинити зміну температури відпрацьованих газів в межах від $\sim 393 \text{ K}$ до 473 K (120°C – 200°C) [7]. Максимальне навантаження відповідає максимальній температурі та максимальним втратам. Мінімальна температура визначена необхідністю підтримання безконденсатного режиму у процесі видалення димових газів. Теоретично в безконденсатному режимі можна досягти підвищення ККД до 4%, знижуючи максимальну температуру димових газів до допустимо низького значення. Проте відомі конструкції енергетичного устаткування неможливо реалізувати такий підхід.

Слід враховувати, що спалювання не всіх горючих газів дають викиди CO_2 , що відноситься до парникових. До таких газів можна віднести вторинні гази, що виробляються або утилізуються. Наприклад, піролізні, газогенераторні гази, одержувані під час переробки сільськогосподарських або деревних відходів, доменний (BFG), коксовий (COG) гази. При використанні BFG і COG викиди CO_2 вважаються частиною основного технологічного процесу, наприклад виробництва коксу або виплавки чавуну, і вже враховані в розрахунках. Таким чином, заміна природного газу (NG) на вторинні гази, що виробляються або утилізуються, в технологічних процесах призводить до зменшення використання NG, що еквівалентно зниження викидів CO_2 в атмосферу як парникового газу. Слід зазначити, що сільськогосподарські та деревні відходи, що використовуються для одержання піролізних та генераторних газів, вважаються відновлюваними джерелами. При спалюванні таких газів викиди CO_2 також не належать до парникових. Зменшення кількості використовуваного NG за рахунок заміни в технологічних

процесах його частини або всього на вторинні гази, що виробляються або утилізуються, є ще одним напрямом зниження парникового ефекту від викидів CO₂.

У проведеному [8] дослідженні здійснювалися теплотехнічні вимірювання з метою виявлення поправочних коефіцієнтів. Ці коефіцієнти були потрібні для корекції результатів розрахунків, заснованих на математичній моделі, з урахуванням параметрів, що характеризують роботу парового котла в робочому стані. В ході дослідження в якості палива використовувалася суміш природного (NG) і доменного (BFG) газу при їх різному співвідношенні. Експерименти було спрямовано на визначення впливу складу паливної суміші на характеристики парового котла. Отримані результати були систематизовані та представлені у таблиці 1, де відображені значущі параметри, отримані у процесі дослідження.

Таблиця 1

Залежність коефіцієнта надлишку повітря за димососом і температури від-хідних газів від навантаження і теплової частки доменного газу [8, табл. 2]

Навантаження котла, т/год	Теплова частка BFG	Коеф. надлишку повітря за димососом	Температура відхідних газів, °C
40	0.755	2.07	174
40	0.491	1.89	161
40	0.198	1.67	148
50	0.710	2.12	178
50	0.647	1.98	176
50	0.327	1.80	148
60	0.644	1.89	185
59	0.599	1.87	181
60	0.389	1.66	157

Зіставлення даних, представлених у виділених рядках, виявило особливість: при однаковому навантаженні збільшення частки менш калорійного газу в паливній суміші та надлишку повітря (баласту) веде не до зниження, а до збільшення температури димових газів, що не було пояснено в роботі.

Проведений аналіз свідчить про вплив обсягу продуктів згоряння на температуру димових газів і, отже, на ККД устаткування.

При постійному навантаженні можливий вплив на кількість продуктів згоряння через заміну NG сумішшю з менш калорійними вторинними газами. Це може дозволити знизити вміст парникової частини CO₂ у димових газах та одно-

часно регулювати склад суміші для контрольованого впливу на кількість продуктів згоряння, температуру димових газів та ККД обладнання.

Метою дослідження є розробка методу управління обсягом продуктів згоряння за умов зміни навантажень котельного устаткування. Досягнення мети може дозволити керувати температурою димових газів і ККД котла.

Для досягнення мети поставлено завдання:

- визначення процесу, що дозволяє впливати на температуру димових газів при заданому навантаженні обладнання;

- визначення параметра, що дозволяє класифікувати допоміжні горючі гази наскільки можна здійснювати різні сценарії управління обсягом продуктів згоряння;

- розрахунок параметрів димових газів при заданому сценарії керування їх обсягом.

Виклад основного матеріалу. У традиційних газових котлах, оснащених стандартним обладнанням і працюючих на паливі постійного складу, регулювання потужності здійснюється шляхом зміни обсягу газо-повітряної суміші, що надходить. Цей метод управління призводить до безпосередньої залежності температури димових газів і, отже, ККД котла, від поточної потужності, що виробляється. Зменшення потужності супроводжується зменшенням обсягу продуктів згоряння, зниженням їх швидкості в газовому тракці та збільшенням часу взаємодії з поверхнями теплообміну. Це призводить до зниження температури відпрацьованих газів і, отже, підвищення ефективності використання котла. Максимальне вироблення потужності відповідає мінімальному ККД системи.

Різниця в температурі димових газів у всьому діапазоні регулювання потужності котла веде до збільшення втрат на максимальному навантаженні при максимальній витраті газу. Але величина цієї різниці може бути зменшена і за збереження діапазону регулювання шляхом зменшення нахилу графіків зміни температури димових газів і, відповідно, ККД. З цією метою, наприклад, при зменшенні потужності може бути збережений об'єм продуктів згоряння, що відповідає максимальній потужності. Збільшення температури димових газів і зменшення ККД може бути парировано шляхом збільшення площі хвостових теплообмінних поверхонь і, тим самим, зменшення температури димових газів у всьому діапазоні зміни навантаження котла.

Збереження обсягу продуктів згоряння у міру зменшення навантаження може бути забезпечене

шляхом заміни частини основного пального газу альтернативним меншою теплотворною здатністю. При цьому цей газ повинен мати специфічні властивості – давати більше продуктів згоряння на одиницю теплотворної здатності ніж основний.

Метод вибору альтернативного газу. Розглянемо в якості основного горючого газу (NG), припускаючи, що він складається тільки з метану. Як альтернативні гази розглядаються BFG, COG, газоподібні компоненти, одержувані при піролізі деревини, а також продукти газифікації деревних відходів при подачі для газифікації повітря. Середній склад таких газів наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Склад (об’ємні частки) та характеристики горючих газів

Склад, характеристики	NG	COG [9]	BFG [9]	піроліз	газогенерація
$C H_4$	1	0.267	–	0.18	–
C_2H_4	–	0.026	–	–	–
H_2	–	0.571	0.036	0.02	0.134
CO	–	0.029	0.254	0.3	0.246
H_2O	–	–	–	–	0.085
CO_2	–	0.042	0.195	0.5	0.058
N_2	–	0.065	0.515	–	0.476
$Q_{н}, \frac{МДж}{(Мгг)^3}$	35.8	17.7	3.4	15	4.57
$V_{дг}, \frac{(Мдг)^3}{(Мгг)^3}$	10.52	5.04	1.51	3.31	1.71
$\omega, \frac{(Мдг)^3}{МДж}$	0.294	0.285	0.444	0.221	0.375

Ці гази мають нижчу теплотворну здатність порівняно з природним газом. Визначимо характер їхнього впливу обсяг димових газів при змішуванні з NG. Для цього введемо і визначимо для кожного з цих газів величину ω . Вона дорівнює відношенню обсягу димових газів, що утворюються при спалюванні 1 м^3 відповідного газу для його теплотворної здатності. Величина відповідає обсягу димових газів, що припадає на одиницю теплотворної здатності. Відповідні величини наведено у таблиці 2.

У табл. 2 $Q_{н}$ – нижча теплотворна здатність, віднесена до 1 м^3 горючих газів; $V_{дг}$ – обсяг димових газів, що утворюється при спалюванні 1 м^3 відповідного пального газу; ω – обсяг димових газів, що відповідає 1 МДж нижчої теплотворної здатності відповідного пального газу. Як окислювач розглядалося повітря, що складається тільки

з кисню та азоту з об’ємним співвідношенням $N_2/O_2 = 0.79/0.21 = 3.76$ при коефіцієнті надлишку окислювача $\alpha=1$ (демонстраційний варіант).

Порівняння отриманих значень величин для альтернативних газів з відповідною величиною для NG дозволяє зробити висновок про можливість організації різних сценаріїв зміни обсягу димових газів. Так при зміні навантаження використання суміші змінного співвідношення NG з $\omega=0.294$ і BFG або генераторного газу з величиною ω більшою, ніж у NG дозволить зберігати обсяг димових газів близьким до постійного. Використання суміші з NG піролізного газу іди COG, що мають меншу ніж у NG величину ω , призведе до зменшення обсягу димових газів при порівнянних навантаженнях.

Приклад результатів розрахунку. Як приклад розглянемо результати реалізації сценарію утримання об’єму димових газів близьким до постійного зменшення навантаження котла. Дані отримані в результаті повіркового теплового розрахунку на основі нормативного методу котла KB-ГМ-4.65. Для розрахунку використовувалися дані, відповідні суміші змінного складу NG та BFG. Об’єм димових газів утримувався на рівні, що відповідає максимальному при спалюванні лише NG (максимальне навантаження). Розрахунки виконані з незначними винятками, які впливають загальний характер зміни визначених параметрів. Розглянуто випадок коефіцієнта надлишку повітря $\alpha_v=1,1$.

Таблиця 3

Склад суміші NG + BFG для різного навантаження котла при $\alpha=1,1$

Частка навантаження, Q/Q_{max}	Об’єм суміші горючих газів, м^3	% метану в суміші	$T_a, \text{К}$	Об’єм димових газів
1	1	100	2182	11,47
0,95	1,9	44,7	2083	11,44
0,9	2,79	25,1	1991	11,41
0,85	3,69	14,9	1894	11,38
0,8	4,58	8,7	1796	11,35
0,75	5,48	4,6	1700	11,32
0,71	6,08	2,5	1636	11,30
0,66	6,97	0	1543	11,26
0,6	6,32	0	1543	10,21
0,5	5,26	0	1543	8,51
0,4	4,21	0	1543	6,81

Адіабатна температура горіння для прийнятих умов при використанні NG визначена як $T_a=2182 \text{ К}$.

При різному, відповідно до зміни навантаження, співвідношенні NG і BFG величина T_a буде різною. Величина T_a визначалася з використанням хімічних ентальпій утворення газів продуктів згоряння на основі теплотворних здібностей відповідних горючих газів та складу їх суміші. У таблиці 3 для різного навантаження котла наведено склад суміші NG + BFG, адиабатні температури горіння цієї суміші і обсяг димових газів, що утворилися. Величини наведені для умов, що відповідають використанню лише NG. Максимальний обсяг димових газів наводиться для нормальних умов спалювання 1 м^3 NG. Максимальна потужність забезпечується використанням лише NG. Обсяг димових газів, близький до постійного, може бути забезпечений тільки до навантаження 0,66 від максимального. У цей момент до складу палива входить тільки BFG. Результати розрахунків ККД та температури димових газів наведено на рис. 1 та рис. 2. Порівняння результатів показують, що використання суміші газів змінного складу призводить до трансформації графіків зміни ККД та температури димових газів. Така особливість проявляється у діапазоні зміни навантаження $Q/Q_{\max} \in [0,6..1]$ під час використання суміші газів регульованого складу. Зменшення ККД за більш високої, але стабільної температури димових газів не слід вважати негативним фактором. Характер їх зміни дозволяє збільшити площу теплообмінних поверхонь (економайзер) без ризику конденсації за низького навантаження.

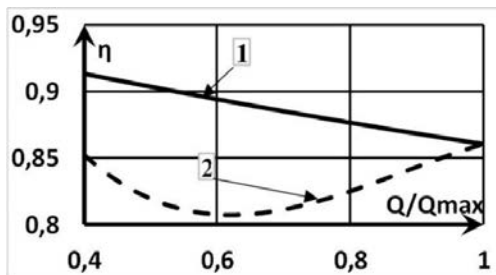


Рис. 1. Зміна ККД при зміні навантаження котла: 1 – NG; 2 – суміш NG+BFG змінного відношення

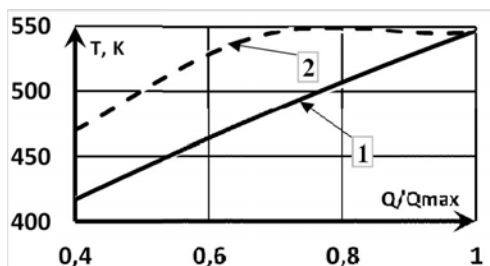


Рис. 2. Зміна температури димових газів при зміні навантаження котла: 1 – NG; 2 – суміш NG+BFG змінного відношення

Подальше зменшення навантаження може відбуватися за рахунок зменшення кількості BFG (метан відсутній). Характер зміни величини ККД та температури димових газів стає відповідним використанню газу постійного складу. Знижена при малих навантаженнях величина ККД при використанні BFG (навіть після збільшення площі теплообмінних поверхонь) також не може вважатися критичним фактором. У цьому пункті мінімальне виділення енергії під час використання допоміжного газу. Отже, й втрати мінімальні. Підвищення ККД відбувається при максимальному навантаженні і при використанні великої кількості викопного газу NG. Отже, у цьому випадку відбувається максимальна його економія та максимальне зменшення парникової частини CO_2 .

Одним з факторів, що ускладнюють реалізацію такої схеми роботи котла є кратне збільшення обсягів суміші газів, що використовується. Встановлені на існуючих котлах пальники не мають необхідної пропускної спроможності. Необхідна установка спеціально розроблених додаткових пальникових пристроїв.

Обговорення результатів розрахунків. Наведені результати розрахунків підтверджують можливість керування кількістю димових газів та, відповідно, їх температурою. Але використання з цією метою газів BFG, COG не є раціональним. Їхня кількість визначається власним технологічним процесом. Крім того, вони не є загальнодоступними.

Піролізні гази можуть бути отримані в будь-якому місці, але можуть виникнути складності з їх використанням. Для забезпечення процесу піролізу необхідне зовнішнє джерело нагрівання. Вихід газоподібної складової мінімальний. Величина ω (табл. 2) мала порівняно з такою самою величиною для NG, що виключає його використання у сценарії утримання об'єму димових газів на рівні, близькому до постійного при зміні навантаження.

Газогенераторні установки в цьому випадку є найбільш прийнятними для вироблення вторинного газу. Вони, як і піролізні, можуть бути встановлені будь-де. Процес термодеструкції в такій установці не вимагає зовнішнього джерела теплової енергії, будучи автотермічним. В результаті такого процесу утворюється газ меншої калорійності, ніж при піролізі. Але газифікації, на відміну від піролізу, може бути піддано всю вуглецевмісну сировину. Це в разі збільшує обсяг одержуваного газу. Враховуючи зниження вартості отримання технічного кисню, замість повітряного дуття може використовуватися повітряне збагачене киснем або навіть кисневе [10–11] показана ефективність

Таблиця 4

Параметри газогенераторного газу				
Параметри	$\varphi=0; \alpha=0,4$		$\varphi=0,4; \alpha=0,5$	
	$\Delta I=0$	$\Delta I=0,25$	$\Delta I=0$	$\Delta I=0,25$
CO	0,454	0,469	0,162	0,175
CO ₂	0,129	0,115	0,223	0,212
H ₂	0,273	0,262	0,236	0,228
H ₂ O	0,145	0,154	0,379	0,385
$Q_{н}, \frac{МДж}{м^3}$	8,67	8,76	4,60	4,67
ω	0,293	0,291	0,401	0,397
T _p , K (°C)	329 (56)	329 (56)	345 (72)	345 (72)

Таблиця 5

Параметри газогенераторного газу після його осушення		
Параметри	$\varphi=0,4; \alpha=0,5$	
	$\Delta I=0$	$\Delta I=0,25$
CO	0,255	0,278
CO ₂	0,351	0,337
H ₂	0,371	0,362
H ₂ O	0,023	0,023
$Q_{н}, \frac{МДж}{м^3}$	7,23	7,42
ω	0,322	0,317
T _p , K (°C)	330 (57)	329 (56)

такого підходу з точки зору підвищення енергетичної цінності одержуваного генераторного газу. Крім того, характеристики і, відповідно, величина генераторного газу можуть змінюватися (регулюватися) за рахунок рекуперації частини його теплової енергії в зону реакції та вологості вихідної сировини. Для демонстрації такої можливості таблиці 4 наведені дані, отримані на основі розрахунків [12] для деревини сосни. Склад газогенераторного газу наведено в об'ємних частках. Прийнято:

- брутто-формула деревини в абсолютно сухому стані $CH_{1,42}O_{0,62}$ з молярною масою $\mu_c=0.0233$ кг/моль та ентальпією утворення $I_0=-152.1$ кДж/моль;

- ΔI – енергія у формі тепла, що повертається за рахунок рекуперації у зону реакції;

- $\alpha_{газ}$ – коефіцієнт надлишку окислювача при дутті у вигляді чистого кисню;

- φ – вологість деревини.

Величини ω і T_p (точка роси) визначені для димових газів, що утворюються з газогенераторного газу відповідного складу при спалюванні його в повітрі з коефіцієнтом надлишку $\alpha_{нов}=1,1$.

З отриманих результатів випливає можливість використання газогенераторного газу, отриманого із сухої деревини без попередньої підготовки. Для цих газів величина і T_p близькі відповідним показниками NG (табл. 2).

У газогенераторних газах із вологої деревини перед їх використанням необхідно зменшувати вміст пари води. Так при їх охолодженні, наприклад, до температури 293 К (20°C) співвідношення складових компонентів, теплотворна здатність і параметри димових газів істотно змінюються (таблиця 5). Після осушення вихідних горючих газів значення вказує на можливість їх використання в суміші з NG для збереження об'єму димових газів близьким до постійного при зміні навантаження котла. У цьому точка

роси димових газів близька до точки роси продуктів згоряння NG.

Висновки. В результаті досліджень отримано такі результати:

Було зроблено припущення про вплив на температуру димових газів в основному їх кількості та, як наслідок, часу зіткнення з теплообмінними поверхнями. Для перевірки цього припущення на прикладі котла КВ-ГМ-4.65 виконаний на основі нормативного методу перевірочний тепловий розрахунок при різному навантаженні. Постійність обсягу димових газів забезпечувалося застосуванням суміші NG та BFG змінного складу. Результатами розрахунку підтверджено збереження температури димових газів, близьких до постійної в широкому діапазоні зміни навантаження навіть при суттєвому зменшенні адіабатної температури горіння. Такий ефект дозволяє наростити площу теплообмінних поверхонь та збільшити ККД котла на максимальному навантаженні без небезпеки конденсації парів води на мінімальному навантаженні.

Запропоновано параметр ω , який визначає здатність різних горючих газів до утворення певного обсягу димових газів на одиницю теплотворної здатності. Такий параметр дозволяє вибирати допоміжні гази, здатні в суміші з NG забезпечувати температуру димових газів, близьких до постійної в широкому діапазоні зміни навантаження. За величиною цього параметра гази можуть бути ранжовані за ступенем переваги використання паливної суміші.

На прикладі газогенераторного газу показано можливість керувати величиною ω змінюючи параметри процесу газифікації. Це може дозволити збільшити гнучкість керування температурою відпрацьованих газів при зміні навантаження котла.

Список літератури:

1. The Paris Agreement. Climate Action. *United Nations*. URL: <https://www.un.org/ru/climatechange/paris-agreement#>
2. Taxonomy: MEPs do not object to inclusion of gas and nuclear activities. *European Parliament website. Press room*. URL: <https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20220701IPR34365/taxonomy-meps-do-not-object-to-inclusion-of-gas-and-nuclear-activities>
3. Qatar supplies gas to Europe, vying with US to replace Russia supply. URL: <https://www.reuters.com/markets/commodities/qatarenergy-shell-agree-27-year-lng-supply-2023-10-18/>
4. Deutschland importiert immer mehr Strom. 06.09.2023. URL: <https://www.dw.com/de/deutschland-importiert-immer-mehr-strom/a-66735523>
5. Vries H., Levinsky H.. Flashback, burning velocities and hydrogen admixture: Domestic appliance approval, gas regulation and appliance development. *Applied Energy*. 2019. Vol. 259, 114116. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114116>
6. Bălănescu D., Homutescu V.. Experimental investigation on performance of a condensing boiler and economic evaluation in real operating conditions. *Applied Thermal Engineering*. 2018. Vol. 143, p. 48–58. URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.082>
7. Taler, J., Trojan, M., Dzierwa, P., Kaczmarski, K., Węglowski, B., Taler, D., Jaremkiewicz, M. . The flexible boiler operation in a wide range of load changes with considering the strength and environmental restrictions. *Energy*. 2023. Vol. 263, part B, 125745. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125745>
8. Bezhan, V., Zhitarenko, V. . Modeling and Analysis of Energy Efficiency Parameters of Medium Pressure Boilers Using a Mixture of Natural and Blast Furnace Gases Taking into Account Air Intakes. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2020. № 2, p. 32–39. URL: <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2020.02.05>
9. Soroka, B., Horupa, V.. Analysis of the process of water vapor condensation within gas atmospheres and combustion products. *Energy Technologies & Resource Saving*. 2017. (1), p. 3-18. URL: <https://doi.org/10.33070/etars.1.2017.01>
10. N. Cerone, F. Zimbardi, A. Villone, N. Strjugas, E. G. Kiyicki. Gasification of Wood and Torrefied Wood with Air, Oxygen, and Steam in a Fixed-Bed Pilot Plant. *Energy & Fuels*. 2016. 30, p. 4034–4043. URL: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b00126>
11. F. Weiland, H. Hedman, M. Marklund, H. Wiinikka, O. Öhrman, R. Gebart. Pressurized Oxygen Blown Entrained-Flow Gasification of Wood Powder. *Energy & Fuels*. 2013. 27 (2), p. 932–941. URL: <https://doi.org/10.1021/ef301803s>
12. В.О. Брунеткін, В.О. Давидов, О.С. Тарахтій. Дослідження термохімічної конверсії органічних речовин з використанням рівноважної моделі. *Вісник ХНТУ, Інженерні науки*. 2023. № 2(85), с. 9–19. URL: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.2.1>

Brunetkin V.O., Davydov V.O., Telpis R.F., Zhanko K.O. METHOD OF MINIMIZING LOSSES WITH FLUE GASES BY CONTROLLING THEIR QUANTITY AT VARIABLE BOILER LOAD

The methods allowing to increase the efficiency of operation and reduce emissions of greenhouse part of carbon dioxide by boilers using natural gas as fuel are considered. The relevance of such a study is due to the planning of industrialized countries to use this type of fossil fuel for a long time. This intention is confirmed by the inclusion of natural gas in the EU Green Taxonomy by the European Commission and the conclusion of long-term contracts for the supply of liquefied natural gas by leading European companies. Under the contracts, gas will continue to be supplied beyond 2050.

Maximum savings can be achieved by reducing losses with flue gases, especially at maximum loads. A method of keeping the flue gas volume close to constant at different boiler loads by using a mixture of combustible gases of variable composition is proposed. Such realization of the process may allow to keep the flue gas temperature close to constant and, accordingly, reduce the associated losses.

The put forward assumption is confirmed by the results of verification thermal calculations of the boiler KV-GM-4.65 for different load. The calculations were performed on the basis of the normative method on the example of a mixture of methane and blast furnace gas of variable composition.

To select an auxiliary gas, allowing in a mixture with methane to realize such a scenario, it is proposed to use the parameter ω , determining the volume of flue gases per unit of its calorific value. The choice of gas is made by comparing this parameter with the corresponding value of methane.

The use of gas-generator gas as an auxiliary gas as the most rational is suggested. On the example of the results of calculation of the composition of gasification products of pine wood waste gasification the possibility of regulation of their composition and calorific value is shown. As factors influencing the composition of gasification products, the oxidizer excess coefficient, wood humidity, the share of energy recovery in the form of heat from the formed gases in the reaction zone are considered. The amount of oxidizer was chosen taking into account complete gasification of feedstock.

Key words: loss reduction, flue gas volume, flue gas temperature control, auxiliary gases.