



М. П. Кулик¹, Т. Ю. Кравець²

¹ Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна

² Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СПАЛЮВАННЯ ОРГАНІЧНОГО ПАЛИВА В КОМБІНОВАНИХ ПАРОГАЗОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВКАХ

Проаналізовано сучасний стан теплової енергетики України, яка через значну зношеність технологічного обладнання та величезні викиди шкідливих речовин в атмосферне повітря, а також нестачу маневрових потужностей, перебуває у критичному стані. Основними шкідливими речовинами, які об'єкти теплової енергетики викидають в атмосферне повітря, є тверді частинки (зола), оксиди сірки, оксиди вуглецю та азоту. Показано, що джерелом утворення деяких з них є атмосферний азот, реакція утворення оксидів якого є ендотермічною, що окрім всього знижує температуру продуктів згоряння та впливає на ефективність традиційного процесу парової генерації електричної енергії. Виявлено, що в енергетиці України широко не використовується газовий цикл генерації електричної енергії. В Україні запропоновано схеми комбінованих парогазотурбінних енергетичних установок, газова частина яких може працювати на продуктах газифікації низькоякісного кам'яного вугілля. Для підвищення ефективного спалювання запропоновано подавати на спалювання органічного палива атмосферне повітря, збагачене киснем, для чого рекомендовано використовувати мембранні технології. Для енергоблоку 200 МВт з котлом ТП-100 під час спалювання вугілля марки Г Львівсько-Волинського басейну проведено розрахунки необхідного вугільного пилу, необхідної кількості атмосферного повітря для його спалювання та об'єму димових газів. Зі збільшенням кисню до 40 % – у повітрі, яке подається на спалювання, об'єм димових газів може зменшитися на величину до 20 % відн.

Ключові слова: паровий та газовий цикл генерації; двохстадійне спалювання вугілля; додаткова топка; мембранні технології розділення повітря; парогазотурбінна установка; маневреність та мобільність вугільних блоків; екологічна безпека.

Вступ. Значна частина викидів шкідливих речовин в атмосферне повітря припадає на штучні (промислові) джерела, серед яких велика частка належить енергетичним котлам, промисловим печам, а також підприємствам кольорової та чорної металургії. Серед технологічних процесів, у яких утворюються такі шкідливі речовини, як сполуки сірки, оксиди азоту, оксиди вуглецю та інші, панівне становище займають процеси спалювання органічного палива (Varlamov, Liubchuk & Maliarenko, 2003; Maliarenko, 2008; Volchyn et al., 2013), що також лежать в основі теплової генерації електричної енергії. Екологічні проблеми теплової енергетики, що пов'язані із зношеністю основного технологічного обладнання, можуть бути вирішені не стільки шляхом розроблення та широким використанням пилотогазоочисного устаткування, а й шляхом підвищення ефективності спалювання органічного палива в комбінованих парогазових енергетичних установках. Такі установки характеризуються широким діапазоном маневреності, високою мобільністю (Kulyk, Mandryk & Mysak, 2016), що робить їх незамінними в разі потреби покриття пікових навантажень у споживанні електричної та теплової енергії.

Аналіз стану питання. Теплові електростанції, промислові та опалювальні котельні, металургійні і цементні

заводи, вугле- та рудозбагачувальні фабрики використовують для потреб основних технологічних процесів спалювання твердого палива, зокрема помеленого кам'яного вугілля, якість якого останнім часом дедалі погіршується. Під час спалювання такого органічного палива в атмосферне повітря викидаються такі шкідливі речовини: тверді частинки у вигляді пилу або золи; оксиди сірки; оксиди вуглецю та азоту.

Серед цих газових викидів найнебезпечнішим є оксид азоту, причому деякі вчені (Kryzhanivskiy & Koshlak, 2016) вважають, що в процесах спалювання палива в котлах й інших пристроях утворюються тільки оксиди азоту, а на виході із димової труби вони досить швидко доокислюються до діоксиду азоту. Інші дослідники (Sigal, 1988) вважають, що тільки 40-80 % оксиду азоту, який міститься в димових газах на виході з димової труби переходить у діоксид азоту.

У різних країнах існують різні підходи до нормування оксидів азоту. Так, на території колишнього СРСР у 90-х роках ХХ ст. діяла максимально разова ГДК на рівні 0,085 мг/м³, а на території Японії діяла більш жорстка норма – 0,035 мг/м³. У розвинених капіталістичних країнах під час будівництва електростанцій не враховували підсилення шкідливої дії спільної присутності в атмосферному повітрі SO₂ та NO₂. Зате дослі-

Інформація про авторів:

Кулик Михайло Павлович, канд. техн. наук, доцент. Email: m_p_kulik@ukr.net

Кравець Тарас Юрійович, канд. техн. наук, доцент. Email: kravetst@ukr.net

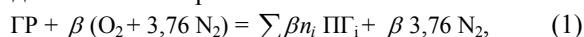
Цитування за ДСТУ: Кулик М. П., Кравець Т. Ю. Підвищення ефективності спалювання органічного палива в комбінованих парогазових енергетичних установках. Науковий вісник НЛТУ України. 2017. Вип. 27(6). С. 98–104.

Citation APA: Kulyk, M. P., & Kravets, T. Yu. (2017). Increase of Combustion Efficiency of Organic Fuels in Combined Steam and Gas Power Plants. *Scientific Bulletin of UNFU*, 27(6), 98–104. <https://doi.org/10.15421/40270620>

дження, які провели деякі зарубіжні та вітчизняні дослідники (Sigal, Gurevich & Dombrowskaia, 1980), показують, що поєднання цих оксидів при концентраціях, рівних сумі ГДК, посилюється шкідлива дія на живі організми.

У топкових камерах котлів та промислових печей, де максимальні температури у факелі сягають 2100-2200 °К, за наявності вільного кисню проходять реакції синтезу оксидів азоту із атмосферного азоту та кисню в атмосферному повітрі. При цьому витрата оксидів азоту пропорційно зростає із підвищенням температури в зоні горіння.

Оцінюючи ефективність процесів спалювання органічного палива користуються здебільшого матеріальним та тепловим балансом процесу горіння, під час якого окислювачем виступає кисень повітря. Схематично реакцію згорання одного моля речовини в повітрі можна представити таким рівнянням:

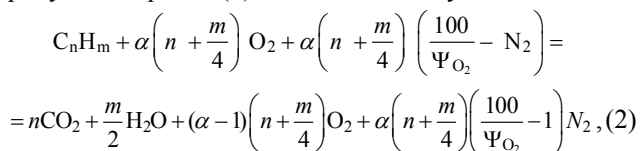


у якому горюча речовина, кисень та азот атмосферного повітря позначені відповідно ГР, O₂, N₂, а під позначенням n_i розуміють кількість молекул i-го продукту горіння, що утворюється з одної молекули горючого, а коефіцієнт β називають стехіометричним коефіцієнтом реакції горіння.

Дійсна кількість повітря, що надходить у зону горіння, відрізняється від теоретичної кількості повітря. Причому, цю реальну кількість повітря, віднесено до одиниці горючої речовини, називають питомим об'ємом повітря, а різницю між реальною і теоретично необхідною кількістю називають надлишком повітря, водночас ця різниця характеризує якість процесу горіння. На практиці користуються коефіцієнтом надлишку повітря, який показує у скільки разів кількість повітря, що дійсно надходить у зону горіння, відрізняється від теоретично необхідної кількості для повного згорання одиниці горючої речовини.

Стехіометричне горіння палива відбувається за коефіцієнта надлишку повітря α=1, якщо α>1 – у продуктах згорання є надлишковий кисень та оксиди окремих горючих елементів, якщо α<1 – у продуктах згорання фіксують нестачу кисню і в них містяться оксиди вищих порядків, а також продукти неповного згорання, у цьому разі не вся хімічна енергія палива переходить в теплову енергію.

Узагальнене рівняння згорання природного газу (суміші вуглеводнів) з утворенням теоретичного складу продуктів згорання (1) можна записати у вигляді:



де: n, m – кількість атомів у молекулі певного вуглеводню; Ψ_{O₂} – об'ємна частка кисню в окислювачі, %.

Із виразу (2) випливає, що під час згорання будь-яких вуглеводнів C_nH_m на одну молекулу горючої компоненти утворюється n молекул вуглекислоти CO₂ і m/2 молекул водяної пари H₂O, які також належать до так званих парникових газів, збільшення концентрації яких впливає на зміну теплової рівноваги на поверхні Землі, а також у місцях великої концентрації водяної пари можуть бути істотні зміни локального мікроклімату.

У димових газах, окрім цього, можуть міститися продукти неповного згорання у вигляді оксиду вуглецю СО, який у побуті називають чадним газом, водню і незгорілих вуглеводнів C_x, H_y, O_z, серед яких своєю токсичністю, яка в сотні разів перевищує токсичність СО, виділяється формальдегід H₂СО.

Серед інших реакцій, які можуть відбуватися в зоні реакції, є проміжні реакції, внаслідок яких утворюються сажа, бенз(а)пірен, а також може проходити дисоціація кисню, атоми якого характеризуються підвищеною хімічною активністю, і при контакті з інертними молекулами азоту за високих температур, сприяють утворенню термічного оксиду. Утворений, унаслідок такої реакції, активний атом азоту реагує з атомом кисню з утворенням додаткового оксиду азоту і хімічного активного атомарного кисню. Таким чином, утворюється досить значна кількість оксидів азоту, концентрація таких термічних оксидів залежить, в основному, від температури в зоні горіння.

Потрібно також зауважити, що в процесі спалювання як газоподібного, так і твердого та рідкого палива, за різними механізмами утворюються оксиди сірки. Ці оксиди також належать до парникових, вони теж характеризуються високою токсичністю, але найбільша їх екологічна небезпека полягає у здатності утворювати кислотні дощі.

Тверде і рідке паливо, окрім цього, містять різні сполуки азоту, які є додатковим джерелом утворення так званих паливних оксидів азоту NO і NO₂.

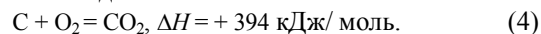
Щодо теплового балансу реакції горіння палива треба пам'ятати, що тепломісткість паливної системи визначається теплотою утворення продуктів горіння та вихідних компонентів системи. Тому тепловий ефект Н_м реакції горіння можна записати:

$$H_m = \sum \Delta H_{\text{пг}} - \sum \Delta H_{\text{гр}}, \quad (3)$$

де ΔH_{пг} і ΔH_{гр} – теплота утворення продуктів горіння та вихідних горючих речовин відповідно. Теплоту утворення речовин можна визначити за допомогою різних довідників або розрахувати згідно з емпіричними рівняннями, виходячи із структури та складу горючої речовини. Теплотою згорання вважають кількість тепла, що виділяється при повному згорянні одиниці кількості речовини за умов, що початкові і кінцеві продукти знаходяться в стандартних умовах. Щодо енергетичних палив, то залежно від агрегатного стану води, що утворилася у процесі горіння, розрізняють вищу Q_v і нижчу Q_n теплоту згорання.

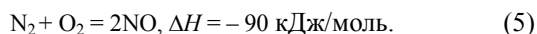
Вищою теплотою згорання вважають ту кількість тепла, яка утворюється при повному згоранні одиниці кількості горючої речовини, в якій водяна пара в продуктах згорання знаходиться у рідкій фазі, а нижчою теплотою згорання – кількість тепла, що виділяється при повному згорянні одиниці кількості горючої речовини за умов, що вода в продуктах горіння знаходиться в газоподібному стані. Існує ще молярна Q – для одного моля (кДж/моль), масова Q' – для одного кілограма (кДж/кг) та об'ємна Q'' – для одного кубічного метра речовини (кДж/м³) теплота згорання. Молярну теплоту згорання можна розрахувати, використовуючи відповідний математичний вираз закону Гесса.

Для простої реакції спалювання вуглевмісного палива, коли завжди проходить процес утворення СО₂, теплота згорання є відомою:



Тепловий ефект реакції горіння твердого палива може бути і визначений експериментально спеціальними приладами (калориметрами), однак такі вимірювання досить трудомісткі та вимагають великих часових затрат, а тому їх проводять у разі неможливості використання закону Гесса.

Під час згорання палива в котельних агрегатах ТЕС та промислових котлах утворюються оксиди азоту, причому реакція утворення має ланцюговий механізм (Yefimov et al., 1990) та протікає з поглинанням теплоти, зокрема:



Внаслідок оборотності цієї реакції, оксиди азоту добре зберігаються за швидкого їх охолодження, що має місце в димовій трубі ТЕС, яка може сягати висоти 250-320 м. Охолоджений оксид азоту вступає у реакцію із атмосферним киснем, внаслідок чого утворюється NO_2 . Швидкість реакції залежить від концентрації реагентів, і зі зменшенням концентрації NO сповільнюється, при цьому в атмосферному повітрі зберігається NO_2 . Надлишок азоту прискорює реакцію, але одночасно збільшення його концентрації знижує температуру горіння, що сповільнює реакції утворення оксидів, але і погіршує економічні показники роботи енергоблоку.

Подальше охолодження димових газів нижче 140°C , що відбувається у гирлі димової труби, частина діоксидів азоту NO_2 переходить у N_2O_4 , частка якого збільшується в міру охолодження. Таким чином, в атмосферному повітрі населених пунктів поблизу території ТЕС можуть утворюватися та існувати різні оксиди азоту, за переважаючого вмісту NO_2 і N_2O_4 . Концентрація оксидів азоту у димових газах котлоагрегатів енергоблоків ТЕС змінюється в досить широкому діапазоні (Yefimov et al., 1990) у перерахунку на NO від 0,015 % до 0,15 % або у масових одиницях 50-750 мг/м^3 за даними (Zdanovskii, 1990; Mysak et al., 2007). На вказані конкретні значення оксидів азоту впливають такі технологічні характеристики обладнання, як тип котельного агрегату та його потужність, режим роботи, а також характеристики палива, тип пальників та ефективна робота пилогазоочисного обладнання.

Щодо походження оксидів азоту, то багато дослідників вважають за доцільне поділяти їх на паливні та атмосферні. Сировиною для перших є азотисті сполуки компонентів твердого або рідкого палива, а для других – молекулярний азот атмосферного повітря, що подається в топку котельного агрегату. Діапазон зміни коефіцієнта надлишку повітря становить 1-1,2, причому для багатоступеневого спалювання він різний для кожної ступені, а для першої ступені (Kobzar & Khalatov, 2015) він може бути менший 0,9.

Виділення невирішеної задачі. У цитованих вище роботах, зокрема (Yefimov et al., 1990; Zdanovskii, 1990; Mysak et al., 2007; Kobzar & Khalatov, 2015), а також (Kryzhanivskiy & Koshlak, 2016; Sigal, Gurevich & Dombrovskaya, 1980), прослідковується думка, що знизити викиди оксидів азоту можна тільки режимними параметрами, які можна змінювати, а це, очевидно із міркувань енергоефективності, можливо тільки в певних межах. Це означає, що в реальних умовах проведення технологічного процесу спалювання вугілля позбутися їх повністю неможливо.

З іншої боку, як зазначено вище, хімічна реакція утворення оксидів азоту є ендотермічною, що призводить до зниження температури в зоні горіння. Окрім цього, більшість реакцій з нейтралізації оксидів азоту теж належать до класу ендотермічних. Зниження температури в зоні горіння зменшує ефективність спалювання органічного палива, а значить знижує коефіцієнт корисної дії котельного агрегату.

Відомо також, що доцільним способом підвищення рівня екологічної безпеки є не зниження викидів того чи іншого шкідливого інгредієнта, а усунення його утворення у джерелі виникнення.

Джерелом утворення оксидів азоту, як відомо, є азот, вміст якого в атмосферному повітрі може сягати 79-80 %. Усунувши із цієї газової суміші (атмосферного повітря) хоча б частину азоту можна пропорційно зменшити кількість атмосферних оксидів азоту.

Відповідно, організувавши багатоступеневе (дво- або триступеневе) спалювання твердого помеленого вугілля, суміщаючи його із підвищенням вмісту окислювача в атмосферному повітрі понад звичну його частку, можна очікувати підвищення температури в зоні горіння та кількості тепла, яка передається робочому тілу за будь-якого способу генерації електричної енергії (паровий, газовий чи парогазовий). Це сприяє підвищенню ефективності процесів спалювання та зменшенню частки неповністю спаленого палива, якого значно меншу кількість потрібно буде подати на початковій стадії технологічного процесу. Такий перехід до "кисневого спалювання" неминуче призведе до відповідного зменшення масової витрати газової суміші, яка надходить на відповідну ступінь спалювання, а також відхідних (димових газів).

Скорочення масової витрати димових газів (до 2-3 разів) з дотриманням стехіометричних співвідношень щодо основного окислювача, мусить привести також до зниження необхідної потужності пилогазоочисних систем (наприклад пиловловального устаткування чи систем очищення димових газів від оксидів азоту, сірки тощо.). Системи такого "кисневого дуття" (холодного чи гарячого) вже успішно використовували у металургії, як у зарубіжній так і вітчизняній ще в середині ХХ ст.

Шляхи вирішення поставленого завдання. Окислювачем під час спалювання органічного палива замість атмосферного повітря може бути збагачена киснем газова суміш, яку зазвичай називають атмосферним повітрям. Збагачення можна проводити додаванням чистого кисню, який добувається на самому підприємстві або закуповується у зовнішнього постачальника. У металургії останньому варіанту надають перевагу. Таке "кисневе дуття" для процесів спалювання органічного палива може бути досить дорогим задоволенням, але у майбутньому із посиленням екологічних проблем, коли плата за викиди шкідливих речовин в атмосферне повітря буде зростати, такий варіант буде ставати дедалі економічно доцільнішим.

Іншим, простішим та дешевішим способом збагачення киснем атмосферного повітря, є його розчинення у звичайній воді, а потім її дегазація. При цьому треба пам'ятати, що обсяги розчинених газів пропорційні парціальним тискам основних компонентів у початковій суміші. За приблизними розрахунками, у 100 об'ємах води може розчинитися при заданих умов 0,8 обсягів кисню і 1,6 обсягів атмосферного азоту. А це вказує на

склад розчиненого повітря: 1/3 кисню та відповідно 2/3 азоту (мольна частка), або в об'ємних відсотках 33,3 % кисню і 66,7 % азоту. Нескладний за апаратурним оформленням процес дегазації води забезпечить збагачення в 1,5 рази киснем суміші, яка подається на спалювання органічного палива, зокрема і кам'яного меленого вугілля низької якості.

Ще наприкінці ХХ ст. автори (Grinchenko & Kulik, 1990, 1992) запропонували для підвищення екологічності енергетичних установок використовувати мембранні технології, які на той час починали стрімко розвиватися. На сьогодні технології некріогенного виробництва азоту на місці споживання забезпечують виділення промислових газів із повітря, причому в цьому плані спостерігається технологічний прогрес (Kuchchenko et al., 2008a, 2008b, 2009, 2010). Такі технології, зокрема мембранні, вже можуть забезпечити розділення атмосферного повітря за температур близьких до температури навколишнього середовища. При цьому для отримання кисню та азоту використовується суттєва різниця між такими їхніми властивостями, як проникність та селективність.

У цитованих вище роботах констатують, що виділення азоту із повітря є достатньо успішним, а виділення кисню за допомогою сучасних мембран може забезпечити зростання вмісту кисню у повітрі на рівні 28-50 % об. і навіть дещо вище. Коефіцієнти проникності кисню змінюються в межах кількох порядків, тоді як селективність α_{O_2/N_2} змінюється в діапазоні від 1,6 до 7,8. Однак таке виробництво кисню стає ще економічно ефективнішим, коли для виробництва кисню будуть використовувати вдосконалені нові (ще на цей час досконало не вивчені, та навіть не розроблені) полімерні матеріали з поліпшеними показниками, наприклад характеристичною мікропористістю. Такі матеріали мають обернено-пропорційну залежність для промислово важливих пар газів, зокрема для O_2 і N_2 , що має величезне значення у разі спалювання органічного палива, зокрема в комбінованих парогазових енергетичних установках.

У таких енергетичних установках, зазвичай, реалізується двостадійне або навіть тристадійне спалювання помеленого кам'яного вугілля, а на початкових стадіях спалювання наявний коефіцієнт надлишку повітря, що менший за одиницю. Теплова енергія, що отримується на таких стадіях, може успішно використовуватися для формування робочого тіла для газового циклу генерації електричної енергії, який може поліпшити маневрові та мобільні характеристики об'єктів теплової генерації.

Сучасний критичний стан теплової енергетики України через зношеність технологічного обладнання та величезні об'єми шкідливих речовин, які викидається в атмосферне повітря, підштовхує керівництво відповідних державних органів громадянське суспільство перейти до переоснащення теплової енергетики із збільшенням частки маневрових потужностей. Варіанти конструктивного оформлення таких комбінованих енергетичних установок із мембранними розділювачами повітря, згадуваних вище, наведено у цій роботі. Зокрема, на рис. 1 показано таку схему із мембранним розділенням повітря та газгольдером азоту.

Збагачене киснем атмосферне повітря, стиснуте у компресорі, надходить у міжкорпусний об'єм топки, де нагрівається та розкручує газову турбіну із окремим електричним генератором. Скид газової турбіни іде на

спалювання твердого палива, яке надходить у додаткову топку.

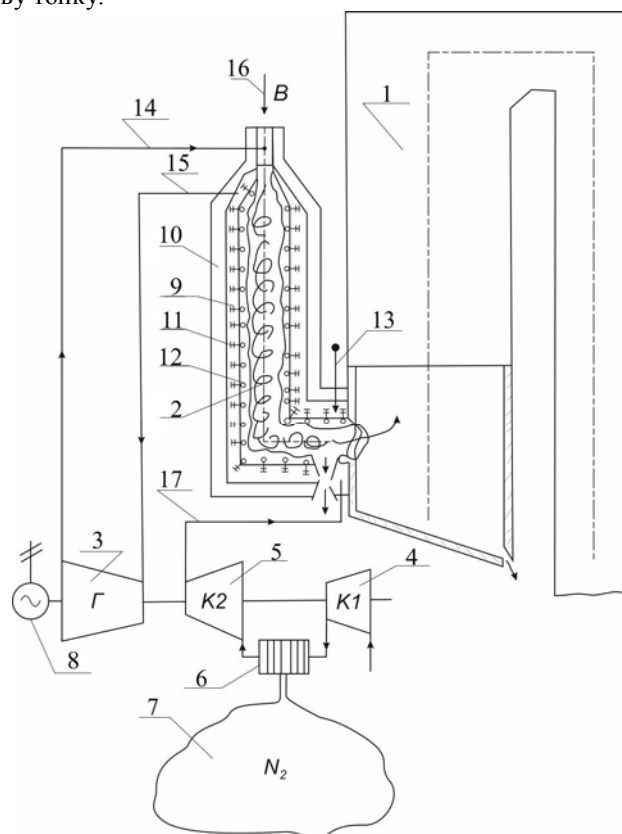


Рис. 1. Комбінована парогазова енергетична установка з мембранним розділювачем повітря: 1, 2) основна і додаткова топки; 3) газова турбіна; 4, 5) перша і друга ступені компресора; 6) мембранний розділювач повітря; 7) газгольдер-накопичувач азоту; 8) електричний генератор газової частини; 9) повітряна сорочка додаткової топки; 10) теплоізоляція додаткової топки; 11) теплові трубки; 12) внутрішня стінка додаткової топки; 13) лінія вприскування пари в сорочку додаткової топки; 14) повітропровід вихлопу газової турбіни; 15) повітропровід робочого тіла, лінія подачі палива у додаткову топку; 17) лінія збагаченого киснем повітря в сорочку додаткової топки

Тут є можливість комплексного використання продуктів розділення атмосферного повітря на фракцію, збагачену киснем і азотну фракцію, коли остання відіграє роль робочого тіла для газового циклу генерації електричної енергії. Удосконалену схему такої установки наведено на рис. 2.

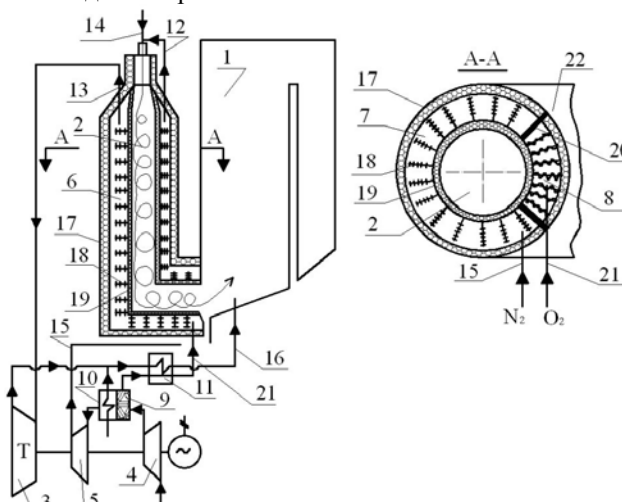


Рис. 2. Принципова схема енергетичної установки з мембранним розділювачем повітря, кисневим та азотним відсіком у до-

датковій топці: 1) основна топка; 2) додаткова топка; 3) газова турбіна; 4, 5) перша та друга ступені компресора; 6) сорочка охолодження додаткової топки; 7, 8) азотний та кисневий відсіки сорочки охолодження; 9) мембранний розділювач; 10) холодильник; 11) регенератор; 12) вихідний патрубок кисневого відсіку; 13) вихідний патрубок азотного відсіку; 14) лінія подачі палива в додаткову топку; 15) лінія стисненого азоту; 16) лінія вихлопу газової турбіни; 17) теплоізоляція додаткової топки; 18) теплові трубки додаткової топки, що вмонтовані у внутрішню стінку; 19) додаткової топки; 20) роздільна стінка відсіків; 21) лінія кисню в кисневий відсік; 22) скид додаткової топки

Для підтвердження деяких припущень, висловлених вище, наведемо деякі результати теоретичних досліджень процесу спалювання кам'яного вугілля марки Г Львівсько-Волинського басейну на енергоблоці 200 МВт з котлом ТП-100 Бурштинської ТЕС. При цьому будемо вважати, що для БуТЕС кам'яне вугілля (якість якого в перспективі буде тільки погіршуватися) має такий склад на робочу масу палива: зольність $A^p = 29\%$; вологість $W^p = 10\%$; нижча теплотворна здатність $Q_H^p = 4650$ ккал/кг (19,47 МДж/кг).

Наявну витрату пилу твердого палива на котел ТП-100 визначено на підставі (Metodicheskie ukazaniia po opredeleniui ..., 1987) за такою формулою, т/год:

$$B_B = B_M \cdot Z \cdot K_T, \quad (6)$$

де: Z – кількість млинів, що працюють; K_T – коефіцієнт готовності пилосистеми; для базових режимів роботи $K_T = 0,9$.

Корисне тепловиділення визначено за такою формулою, ГДж/год:

$$Q_T = B_B \cdot Q_H^p \cdot \eta_K^{op} \cdot 10^{-2}, \quad (7)$$

де Q_H^p – калорійність вугілля, МДж/кг; η_K^{op} – ККД бруто котла, %.

Витрату тепла на турбоагрегат, ГДж/год визначено за такою формулою:

$$Q_0 = \frac{Q_T \cdot \eta_{TP}}{1 - \alpha_\phi} \cdot 10^{-2}, \quad (8)$$

де: η_{TP} – коефіцієнт теплового потоку, %; α_ϕ – частка тепла від загального тепловиділення у разі підсвічування пилувугільного факела мазутом або природним газом ($\alpha_\phi = 0,2$).

Залежність максимальної потужності енергоблоку від витрати тепла на турбоагрегат беремо з нормативних (паспортних) даних для турбоагрегату К-200-130.

Виконавши розрахунки, отримаємо витрати вугілля зазначених вище характеристик на котел ТП-100 залежно від потужності енергоблоку, які зведено у табл. 1.

Табл. 1. Витрати вугілля на котел ТП-100

Потужність енергоблоку N_{el} , МВт	200	160	120
Витрата палива B_B , т/год	89	71	55

Відповідно до (Grigorev, Rundygin & Trinchenko, 2006) вугілля марки Г Львівсько-Волинського басейну має такі характеристики:

$$S_K = 1,9\%; S_O = 0,9\%; C^p = 49,8\%; H^p = 3,3\%; N^p = 0,9\%; O^p = 6,2\%.$$

Для даних характеристик вугілля теоретична кількість сухого повітря, яка необхідна для повного згоряння палива, становитиме:

$$V^0 = 0,0889(C^p + 0,375 S_{O+K}) + 0,265H^p - 0,0333 O^p = 5,189 \text{ нм}^3/\text{кг}.$$

Мінімальний об'єм продуктів згоряння, які утворились би за повного згоряння палива з теоретично необхідною кількістю повітря ($\alpha=1$) становитиме:

$$V^{eo} = V^0_{N_2} + V_{RO_2} + V^0_{H_2O} = 5,625 \text{ нм}^3/\text{кг},$$

де: $V^0_{N_2} = 4,1062 \text{ нм}^3/\text{кг}$ – теоретичний об'єм азоту; $V_{RO_2} = 0,9487 \text{ нм}^3/\text{кг}$ – об'єм трьохатомних газів; $V^0_{H_2O} = 0,57 \text{ нм}^3/\text{кг}$ – теоретичний об'єм водяної пари.

Об'єм продуктів згоряння за повного згоряння палива з надлишком повітря ($\alpha=1,15$) становитиме:

$$V^e = V^0_{N_2} + V_{RO_2} + V_{H_2O} + (1 - \alpha)V^0 = 6,416 \text{ нм}^3/\text{кг},$$

де: $V_{H_2O} = 0,5825 \text{ нм}^3/\text{кг}$ – об'єм водяної пари залежно від α .

Результати розрахунків витрат повітря для спалювання вугілля в котлі ТП-100 залежно від потужності енергоблоку зведено в табл. 2.

Табл. 2. Витрати повітря для спалювання вугілля в котлі ТП-100

Потужність енергоблоку N_{el} , МВт	200	160	120
Витрата теоретичної кількості повітря, V^0 , нм ³ /год	461821	368419	285395
Витрата кількості повітря за $\alpha=1,15$, V^e , нм ³ /год	530094	423681	328204
Об'єм продуктів згоряння за $\alpha=1,15$, V^e , нм ³ /год	570024	455536	352880

Варто також зауважити, що в об'ємах продуктів згоряння не враховано присмоктки повітря в конвективній шахті та газоходах котла.

Для зменшення негативного впливу на навколишнє середовище котлами ТП-100, зокрема зниження викидів оксидів азоту, розглянемо збільшення частки кисню, і відповідно зменшення частки азоту в повітрі, що подається для спалювання палива.

Дослідимо, як зміниться витрата повітря та димових газів, якщо співвідношення між киснем та азотом в повітрі, що подається для спалювання вугілля, змінити на 35/65, 40/60.

Результати розрахунку зведено в табл. 3.

Табл. 3. Витрати повітря та димових газів

Потужність енергоблоку N_{el} , МВт	200	160	120
Об'єм продуктів згоряння за $\alpha=1,15$, V^e , нм ³ /год	570024	455536	352880
Об'єм продуктів згоряння за вмісту кисню в повітрі 30 %, нм ³ /год	505698	403422	312510
Об'єм продуктів згоряння за вмісту кисню в повітрі 40 %, нм ³ /год	483198	485473	298606

Теоретичний об'єм азоту в продуктах згоряння за вмісту кисню в повітрі 30 % становить 3,38 нм³/кг спаленого палива, а за вмісту кисню в повітрі 40 % становить 3,12 нм³/кг спаленого палива.

Отже, бачимо, що внаслідок збільшення вмісту кисню в повітрі, що подається для спалювання вугілля, знижується витрата продуктів згоряння та вміст азоту, що дає змогу підвищити технічні характеристики котла ТП-100 – за рахунок зниження витрати електричної енергії на транспортування димових газів, та екологічні показники – за рахунок зменшення викидів оксидів азоту.

Висновки. На цей час, коли теплова енергетика України перебуває у критичному стані через зношеність основного технологічного обладнання, нестачу маневрових потужностей, а також великий екологічний вплив

на довкілля, є можливість її переоснащення з урахуванням останніх досягнень зарубіжних та вітчизняних науковців. Таке переоснащення пропонуємо провести з використанням комбінованих парогазових енергетичних установок, які використовують поряд із традиційним паровим способом генерації газовий спосіб. При цьому, в комбінованих парогазових енергетичних установках можна реалізувати багатостадійне спалювання низькоякісного кам'яного вугілля в атмосферному середовищі, збагаченому киснем. А мембранні технології розділення повітря на кисневу та азотну фракції спрощують реалізацію роботи газової частини на продуктах розділення без використання дорогого рідкого чи газового палива. У такому разі не тільки покращуються екологічні показники роботи потужних енергоблоків, а можливі покращення їх маневрових характеристик. Зменшення екологічного впливу підтверджується наведеними розрахунками.

Перелік використаних джерел

- Grigorev, K. A., Rundygin, Iu. A., & Trichenko, A. A. (2006). *Tekhnologiya szhiganiia organicheskikh topliv. Energeticheskie topliva: Ucheb. posobie.* SPb.: Izd-vo politekhnicheskogo. universiteta. 92 p. [in Russian].
- Grinchenko, D. N., & Kulik, M. P. (1990). *Perspektivy sozdaniia ekologicheskii chistykh elektrostancii. Tezisy dokladov Respublikanskoi n/t konferentsii "Problemy i opyt okhrany okruzhaiushchei sredy"*, (pp. 67–69). Dnepropetrovsk, 14–16 November, 1990. [in Russian].
- Grinchenko, D. N., & Kulik, M. P. (1992). *Primenenie membrannikh razdelitelei vozdukh dlia povysheniia ekologichnosti energeticheskikh ustanovok. Tezisy dokladov n/t konferentsii "Sovremennye khimicheskie tekhnologii ochistki vozdushnoi sredy"*, (pp. 94–96). September, 1992. Saratov. [in Russian].
- Kobzar, S. H., & Khalatov, A. A. (2015). *Efektivnist znyzhennia vykydiv oksydiv azotu systemoiu stupenevoho spaliuvannia vuhilia dlia kotla TPP-312 bloku №6 DTEK Ladyzhynskoi TES na osnovnykh rezhymakh navantazhennia. Visnyk NTU "KhPI"*, 17(1126), 34–39. [in Ukrainian].
- Kryzhanivskiy, Ye. I., & Koshlak, H. V. (2016). *Ekolohichni problemy enerhetyky. Naftohazova enerhetyka*, 1(25), 80–90. [in Ukrainian].
- Kulyk, M. P., Mandryk, O. M., & Mysak, Y. S. (2016). *Analysis of possibility of using coal technologies to improve manoeuvrability, mobility and ecological compatibility of thermal power plant units. Geomatics and Environmental Engineering*, 10(2), 39–42.
- Kyrychenko, V. I., Osokina, V. K., Rysiuk, B. D., Holubov, O. H., & Novikov, I. M. (2009). *Enerhoefektyvni i chysti tekhnologii v promyslovosti. Khimichna promyslovist Ukrainy*, 5, 22–29. [in Ukrainian].
- Kyrychenko, V. I., Osokina, V. K., Rysiuk, B. D., Holubov, O. H., & Novikov, I. M. (2010). *Membranni tekhnologii v khimichnii i sporidnennykh haluziakh promyslovosti. Perspektyvy rozvytku i vprovadzhennia u vyrobnytstvo. Khimichna promyslovist Ukrainy*, 1, 31–37. [in Ukrainian].
- Kyrychenko, V. I., Osokina, V. K., Rysiuk, B. D., Holubov, O. H., & Novikov, I. M. (2008a). *Neokriohenni tekhnologii vyrobnytstva. 1. Rozdilennia povitria u vyrobnytstvi azotu na misti spozhyvannia. Khimichna promyslovist Ukrainy*, 5, 50–58. [in Ukrainian].
- Kyrychenko, V. I., Osokina, V. K., Rysiuk, B. D., Holubov, O. H., & Novikov, I. M. (2008b). *Neokriohenni tekhnologii vyrobnytstva. 2. Membranni tekhnologii vyrobnytstva kysniu i perspektyvy yikh rozvytku. Khimichna promyslovist Ukrainy*, 6, 58–68. [in Ukrainian].
- Maliarenko, V. A. (2008). *Enerhetychni ustanovky.* Kharkiv: SAHA. 317 p. [in Ukrainian].
- Ukazaniia (1987). *Metodicheskie ukazaniia po opredeleniiu ogranichenii ustanovlennoi moshhnosti teplovykh elektrostancii.* Moscow: SPO Soiuztekhenergo. 28 p. [in Russian].
- Mysak, Y. S., Ivasyk, Ya. F., Hut, P. O., Lashkovska, N. M. (2007). *Obieky teplovykh elektrychnykh stantsii. Rezhymy roboty ta Eksploatatsii.* Lviv: NU "Lvivska politekhnika". 254 p. [in Ukrainian].
- Sigal, I. Ia. (1988). *Zashhita vozdushnogo baseina pri szhiganiu topliva. Leningrad: Nedra.* 311 p. [in Russian].
- Sigal, I. Ia., Gurevich, N. A., & Dombrovskaya, E. P. (1980). *Obrazovanie dvoikisi azota pri rasseivaniu dymovykh gazov. Teploenergetika*, 11, 6–8. [in Russian].
- Varlamov, H. B., Liubchik, H. M., & Maliarenko, V. A. (2003). *Teploenerhetychni ustanovky ta ekolohichni ustanovky vyrobnytstva enerhii.* Kyiv: Politekhnika. 232 p. [in Ukrainian].
- Volchyn, I. A., Dunaievska, N. I., Haponych, L. S., Cherniavskiy, M. V., Topal, O. I., & Zasiadko, Ya. I. (2013). *Perspektyvy vprovadzhennia chistykh vuhilnykh tekhnologii v enerhetyku Ukrainy.* Kyiv: Hnozis. 316 p. [in Ukrainian].
- Yefimov, O. V., Tiutiunyk, L. I., Ivanova, L. A., & Pivovarov, V. V. (2016). *Utvorennia oksydiv azotu pry spaliuvanni palyva v kotlakh. Zbirnyk tez KhKhIY Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii "Informatsiini tekhnologii. Nauka, Tekhnika, Tekhnologhiia, Osvita, Zdorovia"*, 18–20 travnia 2016 r., NTU KhPI, m. Kharkiv. [in Ukrainian].
- Zdanovskii, V. G. (1990). *Modernizatsiia kotloagregatov teplovoi elektrostancii.* Kyiv: Tekhnika. 103 p. [in Russian].

М. П. Кулик¹, Т. Ю. Кравец²

¹ *Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, г. Ивано-Франковск, Украина*

² *Национальный университет "Львовская политехника", г. Львов, Украина*

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЖИГАНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ТОПЛИВА В КОМБИНИРОВАННЫХ ПАРОГАЗОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Проанализировано современное состояние тепловой энергетики Украины, которая из-за изношенности технологического оборудования и больших объемов выбросов вредных веществ в атмосферу, а также нехватки маневренных возможностей, находится в критическом состоянии. Основными вредными веществами, которые выбрасываются в атмосферный воздух, являются: твердые частицы (зола), окись серы, двуокись углерода и оксиды азота. Показано, что источником образования некоторых из них является атмосферный азот, причем реакция образования оксидов азота относится к классу эндотермической, что приводит к снижению температуры продуктов сжигания и влияет на эффективность традиционного парового способа генерации электрической энергии. Выявлено, что в Украине газовый цикл генерации электрической энергии широко не используется. В Украине различными учеными разработаны схемы комбинированных парогазотурбинных энергетических установок, газовая часть которых может работать на продуктах газификации каменного угля низкого качества. Для повышения эффективности сжигания органического топлива в этой работе предложено подавать в процесс сжигания атмосферный воздух, обогащенный кислородом, с использованием мембранных технологий. Для энергоблока 200 МВт с котлом ТП-100 при сжигании угля марки Г Львовско-Волынского бассейна проведены расчеты необходимого количества угольной пыли, обогащенного воздуха, а также объема дымовых газов. Показано, что при увеличении кислорода до 40 % в атмосферном воздухе, который подается на сжигание топлива, объем дымовых газов снижается до 20 % отн.

Ключевые слова: паровой и газовый цикл генерации; двухстадийное сжигание угля; дополнительная топка; мембранные технологии разделения воздуха; парогазотурбинная установка; маневренность та мобильность угольных блоков; экологическая безопасность.

INCREASE OF COMBUSTION EFFICIENCY OF ORGANIC FUELS IN COMBINED STEAM AND GAS POWER PLANTS

Ukraine's thermal energy is in critical condition due to the wear of technological equipment and huge emissions of harmful substances to the atmosphere, while the combined power system of the state is characterized by a significant shortage of maneuver capacity. Combustion of organic fuel in existing boiler units, manufactured in the middle of the last century, is inefficient due to the formation of nitrogen oxides. The reaction of their formation is endothermic, which leads to decrease of flue gas temperature, causing decrease of efficiency of the entire power unit. In order to correct the existing situation, it is proposed in this article while retrofitting existing TPPs, which will have to be implemented, use combined steam and gas power plants, where traditional steam method of electricity generation is combined with gas generation. It is shown that the gas unit of the power plant can work on low-quality coal gasification products. It is expedient to carry out gasification in the additional furnace, where a part of the powdered coal is supplied, the additional furnace itself consists of two-walls and compressed atmospheric air enters the space between the walls for heating and formation of the gas turbine working environment. At this stage, the excess air ratio is slightly less than the stoichiometric amount required for complete combustion. In order to increase the efficiency of combustion in the main and additional furnaces oxygen enriched atmospheric air is used. To enrich the atmospheric air with oxygen, it is reasonable to use membrane technologies that provide two to three times higher oxygen content compared to currently used combustion technologies. As far as oxygen-enriched fraction is used in the combustion process, it reduces the amount of so-called "atmospheric" nitrogen oxides. The nitrogen fraction is utilized in the gas cycle of electricity generation. Such a combined steam and gas power plant has a much larger range of power variations, that is, it is more maneuverable, the speed of power ascension increases – it becomes more mobile, and due to the use of membrane air separation technologies, the amount of formed nitrogen oxides is reduced. The temperature of the flue gases increases which improves the efficiency factor, as well as the amount of flue gases at the flue outlet is reduced.

Keywords: steam and gas generation cycle, two-stage coal combustion, additional furnace, membrane air separation technologies, steam and gas turbine power plant, maneuverability and mobility of coal power plants, environmental safety.