

## ЕНЕРГЕТИКА

УДК 620.92

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.4/27>

**Гламаздін П.М.**

Київський національний університет будівництва і архітектури

**Дяченко А.А.**

Київський національний університет будівництва і архітектури

### ЗБАГАЧЕННЯ КИСНЕМ ДУТТЬОВОГО ПОВІТРЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРОГЕНЕРАТОРІВ

*Потреби в електроенергії в Україні задовольняють 15 теплових електростанцій (ТЕС) і 20 тепло-електроцентралей (ТЕЦ), які побудовані ще в минулому сторіччі. Нині вони не задовольняють ані екологічним вимогам Євросоюзу, ані вимогам з енергоефективності й потребують модернізації. Одним із засобів модернізації може бути збагачення дуттьового повітря в котельних установках ТЕС і ТЕЦ, що зумовлює актуальність роботи.*

*Метою роботи є кількісне визначення можливостей підняття енергоефективності котельних установок ТЕС і ТЕЦ шляхом збагачення киснем дуттьового повітря.*

*Для досягнення поставленої мети в роботі сформульовано такі завдання: проведення теплового розрахунку парового котла на вугіллі; визначення діапазону оптимальних концентрацій кисню в дуттьовому повітрі.*

*Поставлені в роботі завдання вирішувалися розрахунковим методом з використанням нормативного методу теплового розрахунку котельних агрегатів.*

*У результаті проведеного дослідження виявлено позитивний вплив збагачення дуттьового повітря киснем для парових котлів, що використовують як паливо вугілля.*

*Збагачення дуттьового повітря киснем призводить до підвищення ККД котла. Показано, що для експлуатованих котлів є межа збагачення дуттьового повітря киснем, за якою подальше збагачення вимагає суттєвих змін у конструкції котла.*

*При зростанні температури факелу в топці й зменшенні вмісту азоту  $N_2$  в топковому середовищі справедливо чекати більш повного вигорання вугільного пилу й відповідно до цього зменшення втрати тепла зі шлаками ( $q_d$ ). Однак достовірних результатів експериментальних досліджень такого висновку знайти не вдалося, тому цей доданок у топковому балансі котла залишається без змін і приймається аналогічно показнику згідно з нормативним методом теплового розрахунку котельних агрегатів.*

**Ключові слова:** теплоенергетика, парогенератори, тверде паливо, збагачене киснем дуттьове повітря, ККД котла, оксиди азоту.

**Постановка проблеми.** В останні роки в усьому світі превалує тренд на витіснення традиційної енергетики, заснованої на вуглеводневому паливі, системами, які використовують такі відновні джерела енергії, як енергія Сонця, геотермальна енергія й енергія вітру [1]. До цих систем додається тренд на використання як палива водню. У Євросоюзі прийнято рішення про створення в Європі «безвуглецевої зони» до 2050 року в надії на швидку реалізацію цих трендів [2]. Подібні настрої підігриваються успіхами вчених та інженерів у здешевленні технологій виробництва обладнання для подібних систем [3]. При

цьому передбачається, що водень буде отримуватися в електролізерах, використовуючи енергію від сонячних електростанцій. Цей водень навіть отримав спеціальну назву – «зелений водень». Деякі вчені вже підраховали потенційні можливості використання вільної площі Землі для розміщення геліосистем із сонячними панелями [4] для повної заміни ними традиційної енергетики.

Однак сьогодні заміщення традиційних вуглеводневих палив відновними джерелами енергії відбувається не так швидко через низку причин, як технічних, так й економічних. Так, старший виконавчий віце-президент Electricite de France

(EDE) Маріанн Легно на Всесвітньому енергетичному конгресі у 2019 році заявила, що в результаті інвестування величезних сум у відновлювані джерела енергії в Німеччині ціна на енергію для промислових споживачів на 30% вища, ніж у Франції [5]. Водень нині отримується за допомогою електроенергії, яка генерується на газових, вугільних та атомних електростанціях. Можна припустити, що процес заміни традиційних вуглеводневих палив на відновні джерела незворотній, але для цього потрібен час. При цьому традиційні вуглеводневі технології генерації електроенергії ще не вичерпали свої резерви з підвищення енергоефективності й екологічності. Одним із таких резервів є використання кисню для збагачення дуттьового повітря в парових котлах, що працюють на твердому паливі та природному газі.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

У наявних доступних інформаційних джерелах можна відмітити три напрями досліджень з теми, що розглядається:

- інформація щодо перспектив розвитку технології отримання кисню [6–10];
- удосконалення методів організації технологічних процесів у печах різного призначення шляхом збагачення киснем дуттьового повітря [11–13];
- підвищення енергоефективності й екологічних характеристик теплоенергетичних установок збагаченням дуттьового повітря в котлах, що знаходяться в експлуатації [14–18; 20–24].

У першому блоці інформаційних джерел виробники мембранних та адсорбційних установок розділення повітря дають інформацію [6–9] про вже наявні комплекси отримання кисню, а також можливі варіанти сучасних рішень. На основі даних [7] можна чітко побачити розвиток від невеликих і навіть мобільних кисневих генераторів до комплексів паралельно включених установок, що обслуговують заводи хімічної промисловості.

У роботі [10] приводиться аналіз наявних технологій розділення повітря з точки зору можливості їх застосування в енергетичних установках, також наведено якісну характеристику найбільш перспективних способів отримання кисню.

У другому блоці інформаційних джерел роботи [11–13] стосуються збагачення киснем дуттьового повітря в печах, зокрема плавильних. Робиться позитивний висновок щодо такого досвіду на основі отриманого зниження витрати палива при збагаченні дуттьового повітря киснем. У роботі [11] приведено узагальнення такого досвіду і при цьому особливо відмічається підвищення температури топкового середовища. На жаль, досвід

модифікацій дуттьового повітря киснем у печах не вдається перейняти на потреби підняття енергоефективності енергетичних котлів через дві основні причини. Коефіцієнт корисної дії печей і котлів має різні фізичні сутності, і процеси в топках печей і котлів мають вагомні відмінності. До того знайдені джерела інформації стосуються використання природного газу як палива, а в енергетичних парогенераторах більшості українських ТЕС використовується вугілля, а газ іде тільки на підсвітку.

Щодо третього блоку джерел інформації можна їх одразу знову-таки поділити. У світі нині є два підходи до використання кисню в процесах спалювання органічних палив: вугілля – спалювання останнього з використанням кисню в чистому вигляді або з добавкою діоксиду вуглецю ( $\text{CO}_2$ ) та збагачення киснем дуттьового повітря в котлах.

Перший напрям більше розробляється в тих країнах, де основним паливом є вугілля низької якості, – Польщі, Китаї, Швеції, Фінляндії. Ці країни ведуть дослідження нового технологічного оформлення циклу Ренкіна в спеціально розроблених теплоенергетичних установках надкритичних параметрів робочого тіла. Паливом у котлах для цих установок є вугілля, а окиснювачем є кисень у суміші з  $\text{CO}_2$ , який виділяється з продуктів згорання після їх очищення від золи й конденсату методом мембранного розділення та рециркулюється частково в топку котла як робоче тіло. Такий цикл має спеціальну назву «Oxy-fuel combustion», дослідженню його присвячено досить велику кількість публікацій, серед яких найбільш цікавими є такі [14–18]. Але для його реалізації необхідно розробляти й виготовляти нове теплогенеруюче обладнання, що в дійсний час не під силу фінансово електрогенеруючим компаніям України.

Тому в роботі розглянуто другий спосіб використання кисню в процесах спалювання вуглеводних палив – збагачення дуттьового повітря киснем у теплогенеруючих установках, що сьогодні знаходяться в експлуатації.

Узагалі збагачення дуттьового повітря киснем у процесах горіння відомо понад 150 років від патенту Бессемера щодо збагачення доменного дуття киснем та активно використовується в металургії з початку ХХ століття [19]. Однак в інших галузях техніки, у тому числі в енергетиці, цей метод інтенсифікації горіння не знаходив до останнього часу широкого застосування через високу вартість кисню, що отримувався методом криогенного розділення повітря. Лише в останні десятиріччя положення змінилося у зв'язку з розвитком

нових методів отримання кисню – адсорбційного методу [8] і методу мембранного розділення [9].

Вартість отримання кисню цими методами вже дає змогу розглядати можливості впровадження в теплогенеруючих установках.

Проблемі використання кисню для збагачення дуттьового повітря в діючих теплогенеруючих агрегатах і парогенераторах присвячено декілька робіт. У дослідженнях [20–24] відмічається зниження витрати палива при збільшенні концентрації кисню в дуттьовому повітрі, при цьому незалежно від виду палива і типу котла залежності витрати палива від концентрації кисню подібні, вони експоненціальні. Графік підвищення ККД також збільшується експоненціально. У роботі [20] відмічено зростання температури точки роси димових газів при спалюванні природного газу від 58°C при концентрації кисню 21% до 86°C, відповідно, при спалюванні органічного палива в чистому кисні. У праці [21] отримано емпіричні дані роботи газового котла потужністю 5400 кВт при збагаченні дуттьового повітря киснем до 40%. При цьому отримано покращення екологічних характеристик котла. Уміст NOx у димових газах при спалюванні природного газу з використанням збагаченого киснем повітря становив 490 мг/м<sup>3</sup>, а при використанні атмосферного повітря як окисника вміст NOx становив 520 мг/м<sup>3</sup>.

В інших роботах цього блоку джерел проблема розглядається в загальному плані, у них констатується позитивний ефект від збагачення киснем дуттьового повітря й не розглядається конкретний вплив результату цього заходу на процеси в котлі. У більшості з них як паливо приймається до розгляду природний газ.

**Постановка завдання.** Сьогодні в Україні працює 15 ТЕС і 20 ТЕЦ [25], більшість яких використовують як паливо вугілля. Згідно з працею [26], на деяких станціях при паспортному терміні експлуатації 100000 годин обладнання відпрацювало вже 300000 годин. У результаті стан обладнання обумовлює його доволі низьку енергоефективність і високий обсяг забруднюючих викидів у навколишнє середовище, зокрема в атмосферу. Питомі витрати палива збільшуються через нерозрахункові режими та низьку якість палива, склад якого часто не відповідає проектному [27]. Зазвичай це паливо досить низькокалорійне, що призводить до низки негативних факторів. Зниження теплоти згорання призводить до зниження температури факелу, що, у свою чергу, породжує проблему з рідким шлаковидаленням, зменшує глибину вигорання вуглецю, що призводить до

збільшення витрати від механічного недопалу та зі шлаку [28, с. 66]. Такий стан речей зумовлює дослідження в напрямі модернізації експлуатованих на теплових електростанціях парогенераторів. У роботі [29] досліджено вплив температури і способу попереднього нагріву вугільного пилу, а також зменшення присосів на процеси горіння вугільного пилу в топках енергетичних парогенераторів. Установлено вплив зайвини повітря на затримку спалаху летких і позитивний вплив підвищення температури факелу на величину вигорання вуглецю у твердому паливі. У праці [30] розглянуто проблему впливу температури факелу на надійність видалення рідкого шлаку з топки. Зроблено висновок про необхідність підтримання температури факелу на високому рівні. Автори роботи [31] пропонують реконструкцію топки котла ТП-100 у частині заміни пальників з метою підвищення надійності експлуатації й ефективності роботи котла. Усі запропоновані методи підвищення ефективності парогенераторів вимагають суттєвої модернізації парогенераторів із відповідним фінансовим забезпеченням. За таких умов з'являється інтерес до збагачення киснем дуттьового повітря – як до методу, який не потребує складного втручання до конструкцій котлів, що експлуатуються на станціях.

При великих концентраціях кисню температура в топці котла може збільшуватися до величин, при яких стає неприйнятним теплове напруження в топці. Крім того, може суттєво знизитися температура на виході з топки, що призведе до змін у теплообміні в подальших поверхнях нагріву й уведе котел у конденсаційний режим, а також призведе до труднощів у регулюванні пароперегрівачів. Через ці обставини в роботі проведено тепловий розрахунок парового котла ТП-100, який є досить розповсюдженим на українських ТЕС, що використовують як паливо вугілля. Основні технічні характеристики котла представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

**Технічні характеристики котла ТП-100**

Найменування показника	ТП-100
Паропродуктивність, т/год	640
Вид палива	Вугільний пил, газ/мазут
Тиск пари на виході, МПа	13,8
Температура перегрітої пари, °C	570
Температура живильної води, °C	230
ККД котла брутто, %, вугільний пил, газ	87/92

**Виклад основного матеріалу.** Розрахунок проведено згідно з нормативним методом «Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод» 1973 року [32].

Термодинамічні характеристики повітря, азоту, кисню, водяної пари, двоокису вуглецю й інших газів (зокрема при високих температурах), які використані при проведенні розрахунків, прийняті з довідникових джерел [33; 34; 35].

Для проведення теплового розрахунку котла прийнято деякі початкові умови та припущення.

Уважаємо, що повітря складається тільки з азоту (79%) і кисню (21%).

Розрахунки проведені при використанні вугілля марки ГЖП ЦЗФ «Селидівська». Його елементарний склад і теплота згорання наведені в таблиці 2.

Дуттьове повітря попередньо не підігрівається, має температуру  $t^n = 20^\circ\text{C}$ .

Утрати теплоти від хімічної й механічної неповноти згорання ( $q_3, q_4$ ) та втрати теплоти від зовнішнього охолодження ( $q_5$ ) визначаємо за довідковими даними, наведеними в нормативному методі [32]:  $q_3 = 0\%$ ,  $q_4 = 4\%$ ;  $q_5 = 0,26\%$ . При цьому можна вважати, що збагачення дуттьового повітря киснем має призвести до мінімізації втрати з хімічним недопалом  $q_3$ , а котел пройшов процедуру налагодження. Витрати з механічним недопалом  $q_4$  найбільше залежать від стану системи пилоприготування й температури факелу. На стан систем пилоприготування збагачення киснем дуттьового повітря вплинути не зможе, як і на конструкції пальників.

Коефіцієнт надлишку повітря приймаємо  $\alpha = 1$ . Прийнято, що в процесі проходження по газовому тракту котла коефіцієнт надлишку повітря не змінюється, бо він може сильно варіюватися для різних котлів. Присоси залежать від стану котлів.

Оскільки ми прийняли витрату  $q_3$  як відсутню, то можна прийняти зайвину повітря теж як відсутню ( $\alpha = 1$ ) [32].

На погляд авторів, прийняті припущення і спрощення не внесуть кардинальних змін в опис перебігу змін у процесах, що відбуваються в котлі при збагаченні киснем дуттьового повітря.

Тепловий розрахунок показав, що зі збільшенням концентрації кисню в дуттьовому повітрі відбуваються такі зміни:

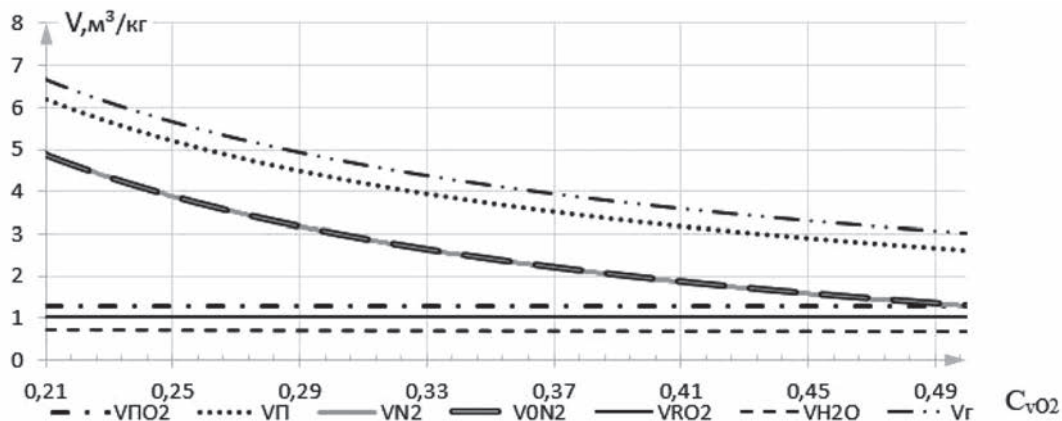
- зменшення об'єму дуттьового повітря (рис. 1);
- зменшення об'єму азоту в дуттьовому повітрі (рис. 1);
- зменшення об'єму димових газів (рис. 1);
- зменшення вмісту (рис. 1) та об'ємної частки азоту в димових газах (рис. 2);
- збільшення об'ємної частки водяних парів у вихідних газах (рис. 2) з одночасним деяким зменшенням їх об'єму (рис. 1);
- збільшення об'ємної частки трьохатомних газів при їх постійному об'ємі в продуктах згорання (рис. 2);
- зниження температури вихідних газів.

Названі основні результати розрахунку супроводжуються також важливими й цікавими обставинами. Так, значення співвідношення відсотків кисню та азоту в дуттьовому повітрі  $N_2^n/O_2^n$  при

Таблиця 2

**Елементарний склад вугілля, прийнятий для розрахунку**

$C^p, \%$	$H^p, \%$	$N^p, \%$	$O^p, \%$	$S^p_k, \%$	$S^p_{op}, \%$	$A^p, \%$	$W^p, \%$	$\Sigma, \%$	$Q_{н}^p, \text{ ккал/кг}$
57,64	4,58	0,72	6,87	1,25	0,77	18,07	10,1	100	5324



**Рис. 1. Залежність об'ємів необхідного кисню, повітря та продуктів згорання вугільного пилу від концентрації кисню в дуттьовому повітрі**

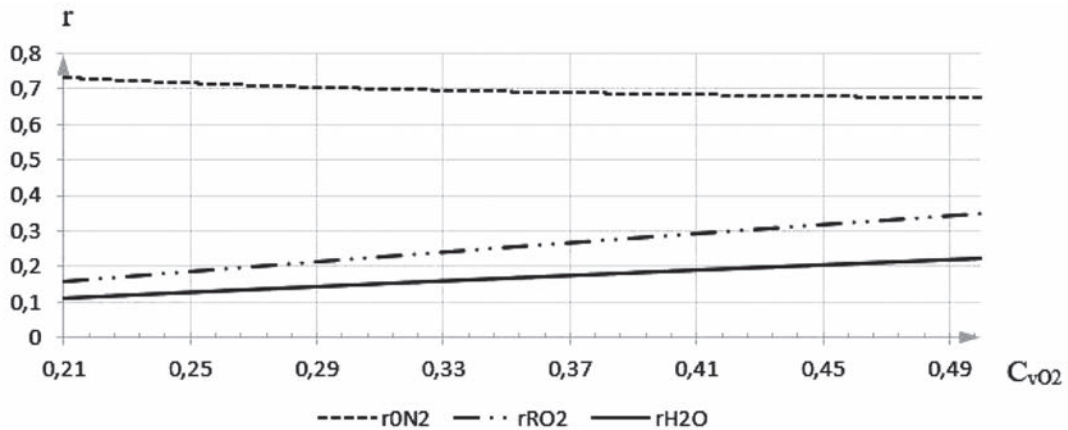


Рис. 2. Залежність об'ємних часток продуктів згорання вугільного пилу від концентрації кисню в дуттьовому повітрі

зміні концентрації кисню має нерівномірний характер, змінюється за експонентою, що пояснює експоненціальне зменшення об'єму азоту при підвищенні концентрації кисню, а це тягне за собою експоненціальне зменшення об'єму дуттьового повітря та димових газів. Узагалі значну частку ( $\beta$ ) ентальпії димових газів становить ентальпія азоту (рис. 3). Через експоненціальне зменшення об'єму азоту з підвищенням концентрації кисню в дуттьовому повітрі ентальпія вихідних газів також зменшується експоненціально.

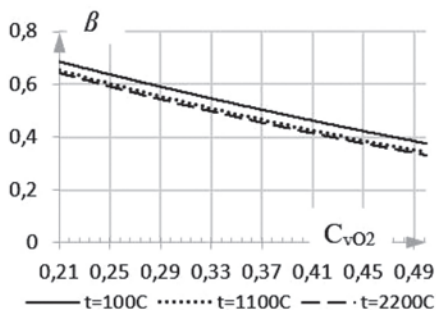


Рис. 3. Залежність частки  $\beta$  ентальпії азоту в димових газах від концентрації кисню в дуттьовому повітрі при різних температурах

Збільшення об'ємних часток, відповідно, і парціального тиску трьохатомних газів і водяної пари у вихідних газах пояснюється зменшенням парціального тиску азоту при постійному тиску вихідних газів.

Незначне зменшення об'єму водяної пари у вихідних газах пояснюється зменшенням об'єму дуттьового повітря, відповідно, і водяної пари  $V^{H_2O}=0,0161V^a$ , що міститься в ньому, за умови, що вологовміст газоподібного палива приймаємо  $d_r=0$ , а водяна пара з'являється у вихідних газах унаслідок реакції горіння вуглеводнів (рис. 1).

Зі зменшенням температури, об'єму й ентальпії димових газів зменшується витрата з димовими газами втрати  $q_2$  (рис. 4). Зі зменшенням утрат теплоти  $q_2$  зростає ККД котла. Позитивний ефект спостерігається в усьому діапазоні підвищенні концентрації  $O_2$ , але експоненціальне зменшення об'єму азоту при постійному об'ємі кисню викликає нерівномірність зростання ККД котла. Так, при збільшенні вмісту кисню до 22% ККД зростає на 0,019%, 22–23% – на 0,017% з подальшим зростанням за експонентою (рис. 5).

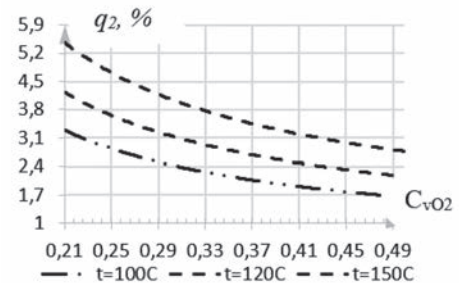


Рис. 4. Залежність витрат теплоти з димовими газами від концентрації кисню в дуттьовому повітрі

Найбільш помітне зростання ККД, що можна побачити з графіка (рис. 5) залежності його від концентрації кисню, відбувається в діапазоні 21–30% концентрації кисню в дуттьовому повітрі, у подальшому приріст ККД значно зменшується.

Теоретичний аналіз процесу горіння вуглецю [36, с. 206; 37, с. 112] показав, що процес переходить декілька стадій, які спрощено можна розташувати так: прогрів частинки пилу, вихід летких, займання летких і їх горіння, горіння вуглецю. Сьогодні кожна із цих стадій розкладається на менші стадії, їх число може доходити до 11 [38, с. 106]. Але нас цікавить передусім стадія

займання й горіння летких. Чим скоріше пройде займання летких, тим більше часу залишиться в частинки вугільного пилу для вигорання вуглецю, що міститься в ній, за час перебування в топці, бо для горіння вуглецю необхідна висока температура, яка має місце тільки в топці. Затримка в займанні летких залежить від швидкості дифузії кисню до частинки пилу крізь баласт у дуттьовому повітрі – азот. Чим менший уміст азоту, тим скоріше настає займання летких, що зумовлює збільшення глибини вигорання вуглецю. У результаті через збагачення киснем дуттьового повітря ми можемо зменшити витрати зі шлаками  $q_6$  і від механічної неповноти згорання  $q_4$  в тепловому балансі, а від того й ще більше підняти ККД.

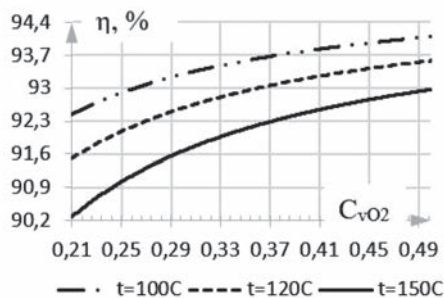


Рис. 5. Залежність ККД котла від концентрації кисню в дуттьовому повітрі

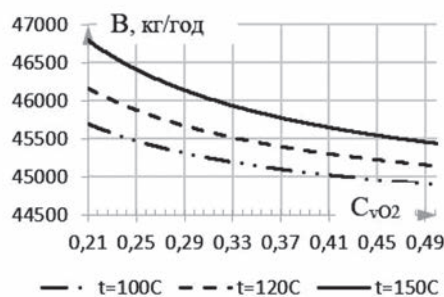


Рис. 6. Залежність витрати палива від концентрації кисню в дуттьовому повітрі

**Висновки.** Збагачення дуттьового повітря киснем призводить до низки змін у роботі теплогенеруючих пристроїв, зокрема парогенераторів на твердому паливі.

Змінюється склад топкового середовища та його теплофізичні характеристики, а також кількість

димових газів. Кількість димових газів зменшується. Збільшується в складі топкового середовища об'ємна частка трьохатомних газів і водяної пари з відповідним зменшенням умісту азоту. Через це інтенсифікуються теплообмінні процеси в топці котла, що призводить до збільшення поглинання теплоти екранними поверхнями топки й падіння температури димових газів на виході з топки.

Зменшення кількості димових газів призводить до зменшення їх швидкостей у конвективних поверхнях, що знижує частку конвективної теплопередачі в загальному теплообміні в повітропідігрівачі й економайзері.

Це повинно було б підтримувати температуру на виході з котла на більш-менш постійному рівні. Але зростання ступеня чорноти димових газів через збільшення об'ємної частки трьохатомних газів і водяної пари все ж таки призводить до її зменшення на виході з котла.

Збагачення киснем дуттьового повітря дає змогу суттєво зменшити зайвину повітря (можливо, і взагалі відмовитися від неї).

Зменшення кількості азоту призводить до зменшення ентальпії димових газів на виході з котла.

Усі ці фактори однозначно призводять до суттєвого зменшення витрати  $q_2$  з димовими газами в тепловому балансі котла, відповідно, і до підвищення ККД. До підвищення ККД призводить також можливість мінімізувати втрати з хімічним недопалом  $q_3$ . Підвищення ККД зменшує витрату палива. Згідно з розрахунком, витрата палива зменшується з 45700 кг/год при незбагаченому киснем дуттьовому повітрі до 44900 кг/год при збагаченні до 50% (рис. 6).

Є ще деякі моменти, які не враховані в загальному аналізі. Це очевидне зменшення споживання електроенергії на привід тягодуттьових машин, пов'язане зі зменшенням об'ємів дуттьового повітря та димових газів, а також для приводу вугільних млинів і систем подачі вугільного пилу в топку котла у зв'язку зі зменшенням споживання палива.

Загалом можна сказати, що збагачення киснем дуттьового повітря – це перспективний метод підвищення енергоефективності теплогенеруючих установок на твердому паливі, що сьогодні знаходяться в експлуатації без суттєвих змін у конструкції котлів.

#### Список літератури:

1. Міхненко С. ВДЕ тренди 2021 року. *AW-THERM*. Січень-лютий 2021. С. 22–23. URL: <https://aw-therm.com.ua/vde-trendi-2021-roku/> (дата звернення: 10.05.2021).
2. 2050 Long-Term Strategy / Climate Action. URL: [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_en) (дата звернення: 19.03.2020).

3. Солнечная панель дешевле 3 долларов за квадратный метр? Это теперь возможно. *AW-THERM*. Січень-лютий 2021. С. 30–32. URL: <https://aw-therm.com.ua/pv-panel-deshevle-3-dollarov-za-kvadratnyj-metr/> (дата звернення: 06.06.2021).
4. Хватит ли Земли для ВИЭ? *AW-THERM*. Січень-лютий 2021. С. 26–29. URL: <https://cutt.ly/bm2hW4R> (дата звернення: 12.07.2021).
5. В EDF отметили отсутствие пользы от перехода Германии на возобновляемые источники энергии. URL: <https://energосmi.ru/archives/40145> (дата звернення: 12.07.2021).
6. Oxygen generator plants by Linde. URL: <https://cutt.ly/ObOBGht> (дата звернення: 15.07.2021).
7. PSA and Membrane Gas Separation Technology – The Frequently asked Question. URL: <https://www.poxegio.com/service/faq.html> (дата звернення: 19.07.2021).
8. Установка короткоцикловой адсорбции (КЦА). URL: <https://cutt.ly/9bOXloo> (дата звернення: 19.07.2021).
9. Мембранные кислородные установки. URL: <https://cutt.ly/qbOXPM3> (дата звернення: 15.07.2021).
10. Кулик М.П., Кравець Т.Ю., Семерак М.М. Аналіз наявних технологій розділення повітря для підвищення ефективності спалювання палива в теплоенергетиці. URL: <https://cutt.ly/ebOBhaB> (дата звернення: 15.07.2021).
11. Використання кисню і збагаченого киснем повітря в нагрівальних печах, колодязях, стендах розігрівання сталерозливних ковшів / І.Н. Карп, А.Н. Зайвий, Е.П. Марцевой, К.Е. П'яних. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2012. № 3. С. 18–29.
12. Экономические аспекты обогащения воздушного дутья кислородом в нагревательных и термических печах / С.М. Кабишов, И.А. Трусова, П.Э. Ратников, Д.В. Менделев. *Металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов*. Вып. 35. Минск : БНТУ, 2014. С. 8–16.
13. Интенсификация тепловых процессов в высокотемпературных установках на примере нагревательных печей ОАО «БМЗ» путем обогащения воздушной смеси кислородом / С.М. Кабишов, И.А. Трусова, П.Э. Ратников, Д.В. Менделев. *Литье и металлургия : научно-производственный журнал*. 2012. № 3 (67). С. 218–221.
14. Sanghyun Park, Jungeun A. Kim, Changkook Ryu, Won Yang, Young Ju Kim, Sangil Seo, School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon Korea «Effects of gas and particle emissions on wall radiative heat flux in oxy-fuel combustion». URL: <https://cutt.ly/xbOMa1q> (дата звернення: 19.07.2021).
15. Yukun Hu, KTH Royal Institute of Technology School of Chemical Science and Engineering Department of Chemical Engineering and Technology Energy Processes Stockholm, Sweden, «CO<sub>2</sub> capture from oxy-fuel combustion power plants». URL: <https://cutt.ly/qbOMzpt> (дата звернення: 19.07.2021).
16. Isabel Guedea, Irene Bolea, Carlos Lupiáñez, Luis I. Díez, Luis M. Romeo., (CIRCE, Spain), «Oxyfuel combustion of Spanish anthracite in fluidized bed». URL: <https://cutt.ly/EbOMmf1> (дата звернення: 19.07.2021).
17. Monika Kosowska-Golachowska, Adam Luckos, Konrad Klos, Tomasz Musial, (Czestochowa University of Technology Institute of Thermal Machinery Armii Krajowej Czestochowa, Poland), «Oxy-combustion of different coals in a circulating fluidized bed». URL: <https://cutt.ly/5bOMENx> (дата звернення: 19.07.2021).
18. Toni Pikkarainen, Jaakko Saastamoinen, Heidi Saastamoinen, Timo Leino and Antti Tourunen, (Technical Research Centre of Finland), «Development of 2<sup>nd</sup> generation oxyfuel CFB technology – smallscale combustion experiments and model development under high oxygen concentrations». URL: <https://cutt.ly/obOMYQt> (дата звернення: 19.07.2021).
19. Nov. 11, 1856: Bessemer Becomes the Man of Steel. URL: <https://www.wired.com/2010/11/nov-11-1856-bessemer-becomes-the-man-of-steel-2/> (дата звернення: 20.07.2021).
20. Ратников П.Э., Менделев Д.В. Оптимизация топливно-кислородных режимов сжигания газообразного топлива в теплогенерирующих установках.
21. Технико-экономическая эффективность использования дутья, обогащенного кислородом, в отопительных котлах малой мощности / П.Э. Ратников, Д.В. Менделев, И.А. Трусова, С.М. Кабишов. *Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Серия «Энергетика»*. 2013. № 6. С. 52–58.
22. Методика оценки энергоэффективности обогащения воздуха кислородом при сжигании газообразного топлива / В.И. Тимошпольский, С.М. Кабишов, И.А. Трусова и др. *Энергоэффективность*. 2013. № 1. С. 32–34.
23. Эффективность применения кислорода при сжигании различных видов топлива / В.И. Тимошпольский, С.М. Кабишов, И.А. Трусова, Д.В. Менделев, Г.А. Румянцева. *Энергоэффективность*. 2013. № 12. С. 36–38.
24. Мищенко М.В., Маслов В.А., Дзюбенко О.Л. Повышение экономической эффективности процессов топливных теплоэнергетических установок путем обогащения технологического воздуха кислородом. *Современные научные исследования и инновации*. 2011. № 7.

25. Список тепловых электростанций Украины. URL: <https://cutt.ly/bm2jJcZ> (дата звернення: 20.07.2021).
26. Клепиков В.Б., Мехович С.А., Клепикова С.В. Экономический, энергоресурсосберегающий и экологический аспекты экономии электроэнергии в Украине. *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. 2010. № 12 (82). URL: <https://cutt.ly/gbOVIM7> (дата звернення: 19.07.2021).
27. Дрьомін В.П., Костенко Г.П., Згуровець О.В. Аналіз витрат палива блоками ТЕС і можливостей їх економії при регулюванні електроспоживання. *Проблеми загальної енергетики*. 2008. № 17. URL: <https://cutt.ly/vbOVDrP> (дата звернення: 19.07.2021).
28. Белосельский Б.С., Барышев В.И. Низкосортные энергетические топлива: Особенности подготовки и сжигания. Москва : Энергоатомиздат, 1989. 136 с.
29. Семергей В.А., Бирюков А.Б. Совершенствование технологи сжигания пылеугольного топлива в топках энергетических котлов. с. 24.
30. Рохман Б.Б. Численный анализ различных схем реконструкции существующей системы пылеприготовления при переводе парогенератора ТП-100 с АШ на газовый каменный уголь. С. 6–16.
31. Мірошніченко Є.С., Чернявський М.В., Порівняльний аналіз застосування різних схем організації пилосистем котла ТП-100 для спалення кам'яного вугілля з досягненням оптимального топкового режиму. С. 13–32.
32. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод / под ред. Н.В. Кузнецова и др. Москва : Энергия, 1973. 296 с.
33. Ривкин С.Л. Термодинамические свойства газов. 4-е изд., перераб. Москва : Энергоатомиздат, 1987. 288 с.
34. Термодинамические свойства азота. ГСССД : монография / В.В. Сычев, А.А. Вассерман, А.Д. Козлов и др. Москва : Издательство стандартов, 1977. 352 с.
35. Александров А.А., Григорьев Б.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара : справочник. Москва : МЭИ, 1999. 169 с.
36. Лавров Н.В. Физико-химические основы горения и газификации топлива. Москва : Metallurgizdat, 1957. 288 с.
37. Горение углерода / Л.Н. Хитрин, О.А. Цуханова, Х.И. Колодцев, М.К. Гродзовский. Москва-Ленинград : Издательство АН СССР, 1949. 407 с.
38. Делягин Т.Н., Лебедев В.И., Пермяков Б.А. Теплогенерирующие установки. Москва : Стройиздат, 1986. 560 с.

**Glamazdin P.M., Diachenko A.A. OXYGEN ENRICHMENT OF BLOWING AIR OXYGEN TO INCREASE ENERGY EFFICIENCY OF ENERGY STEAM GENERATORS**

*Electricity needs in Ukraine are met by 15 thermal power plants (TPPs) and 20 thermal power plants (CHPs), which were built in the last century. At present, they do not meet either the EU's environmental or energy efficiency requirements and need to be modernized. One of the means of modernization may be the enrichment of blast air in the boiler plants of thermal power plants and combined heat and power plants, which determines the urgency of the work.*

*The aim of the work is to quantify the possibilities of raising the energy efficiency of TPP and CHP boilers by oxygen enrichment of blast air.*

*To achieve this goal, the following tasks are formulated in the work: conducting thermal calculation of a steam boiler on coal; determining the range of optimal oxygen concentrations in blast.*

*The tasks set in the work were solved by the calculation method using the normative method of thermal calculation of boiler units.*

*The study revealed a positive effect of enrichment of blast air with oxygen for steam boilers using coal as fuel.*

*Enrichment of blast air with oxygen leads to increased boiler efficiency. It is shown that for the operated boilers there is a limit of enrichment of blast air with oxygen, according to which further enrichment requires significant changes in the boiler design.*

*As the temperature of the flare in the furnace increases and the N<sub>2</sub> nitrogen content in the combustion medium decreases, it is fair to expect a more complete combustion of coal dust and, accordingly, a reduction in heat loss with slags (q<sub>δ</sub>). However, reliable results of experimental studies could not be found, so this addition in the furnace balance of the boiler remains unchanged and is taken similarly to the indicator according to the normative method of thermal calculation of boiler units.*

**Key words:** heat power, steam generators, solid fuel, oxygen-enriched blast air, boiler efficiency, nitrogen oxides.