

О.Л.Чайка, к.т.н., с.н.с., зав. лаб. ТЕТ, ORCID 0000-0003-1678-2580

Б.В.Корнілов, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-5544-3023

А.О.Москалина, к.т.н., н.с., ORCID 0000-0001-9552-2853

В.В.Лебідь, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0003-3938-3785

М.Г.Джигота, провідний інж., ORCID 0000-0003-3062-5127

Інститут чорної металургії ім.З.І.Некрасова НАН України

С.А.Каріков, нач. доменного цеху ПрАТ «МК «Азовсталь»

ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ РОБОТИ ДП №3 ПРАТ «МК «АЗОВСТАЛЬ» З ПРИРОДНИМ ГАЗОМ І З ПВП ПІСЛЯ КАПІТАЛЬНОГО РЕМОНТУ ПЕЧІ

Анотація. У 2019 р. за технологічним завданням ІЧМ НАНУ виконано реконструкцію доменної печі (ДП) №3 ПрАТ «МК «Азовсталь» для тривалого енергоефективного виробництва чавуну із застосуванням пиловугільного палива (ПВП) до 180 кг/т зі зміною профілю по ТЛЗ ІЧМ. Конструкція профілю ДП №3 відповідає кращим світовим рішенням для печей, які ефективно працюють з ПВП, а піч оснащена п'ятьма математичними моделями ІЧМ («Горн», «Шахта», «Теплові втрати», «Завантаження», «Шлак»). Фахівці ІЧМ розробили рекомендації та здійснювали технологічний супровід роботи ДП №3, що дозволило збільшити зйом чавуну з проектних 2,1 т/м³ до 2,27 т/м³, досягти кращих показників в доменному цеху по витратам коксу та умовного палива за рахунок збільшення пропускної здатності системи завантаження, застосування раціональної матриці завантаження, підтримання оптимального перепаду тисків в печі, який дозволяє максимально повно використовувати потужності повітродувної машини, форсування печі технічним киснем та інших заходів. З використанням теплоенергетичної моделі І.Д. Семикіна виконано порівняльний аналіз кращих за шість місяців показників теплової роботи та техніко-економічних показників ДП №3 ПрАТ «МК «Азовсталь», об'ємом 1800 м³ до (робота з природним газом) та після капітального ремонту (робота з ПВП і з природним газом). З використанням ексергетичного методу аналізу на основі результатів розрахунку теплоенергетичних балансів виконано порівняльний аналіз зміни енергоефективності та екологічних показників ДП №3 до і після її капітального ремонту. Показана доцільність комплексного освоєння режимів роботи та модернізації доменної печі для тривалої і енергоефективної роботи з ПВП. Розкрито механізм поліпшення техніко-економічних показників роботи після капітального ремонту за рахунок зміни теплоенергетичних умов роботи доменної печі після капітального ремонту.

Ключові слова: доменна піч, пиловугільне паливо, природний газ, продуктивність, витрати коксу, енергоефективність, ексергія, КПД, екологічні показники

Посилання для цитування: Чайка О.Л., Корнілов Б.В., Москалина А.О., Лебідь В.В., Джигота М.Г., Каріков С.А. Теплоенергетичний аналіз показників роботи ДП №3 ПРАТ «МК «АЗОВСТАЛЬ» з природним газом і з ПВП після капітального ремонту печі. //«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2020. - Вип.34. – С.47-61. (In Ukrainian).
DOI 10.52150/2522-9117-2020-34-47-61

Вступ. Перехід з природного газу на технологію вдування пиловугільного палива окремо та спільно з природним газом на металургійних комбінатах України (ПАТ «Запоріжсталь», ПрАТ «МК «Азовсталь», ПрАТ «ММК ім. Ілліча», ПАТ «ДМКД», ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг») призвів до зміни розподілу матеріальних, теплоенергетичних та ексергетичних потоків в печі, що відбилося на її тепло-газодинамічному режимі роботи, техніко-економічних та екологічних показниках.

Дослідження впливу застосування ПВП та природного газу на розподіл матеріальних, теплоенергетичних та ексергетичних потоків в печі, їх вплив на показники доменної плавки представляє істотний інтерес для вдосконалення технології застосування ПВП. Тому виконано порівняльний аналіз показників роботи ДП №3 до (із застосуванням тільки природного газу) та після її капітального ремонту (із застосуванням ПВП і природного газу).

Методика дослідження. Аналіз виконано з використанням теплоенергетичного розрахунку І.Д. Семикіна та ексергетичного балансу, який є розвитком праць А.В. Бородуліна і В.С. Степанова [1,2].

Основні результати дослідження. З використанням теплоенергетичної моделі І.Д. Семикіна [1,3] виконано порівняльний аналіз показників теплової роботи, техніко-економічних показників ДП №3 ПрАТ «МК «Азовсталь», об'ємом 1800 м³ до і після капітального ремонту зі зміною профілю по ТЛЗ ІЧМ. Для зіставлення обрано кращі за показниками періоди – по 6 місяців в 2011 р. і 2020 р.

Порівняльний аналіз показав, що основні техніко-економічні показники ДП №3 в 2020 р в порівнянні з 2011 р поліпшилися (табл. 1-2):

- виробництво збільшилося на 25÷42%, з 2960÷3230 до 4025÷4205 т/добу;
- сумарні витрати коксу та коксового горіху зменшилися на 24÷33%, з 500÷525 до 350÷380 кг/т;
- витрати умовного палива зменшилися на 9÷19%, з 615÷640 до 520÷560 кг/т;
- витрати сумарного палива в коксовому еквіваленті зменшилися на 10÷17%, з 580÷605 до 500÷520 кг/т;
- сумарні викиди CO₂ зменшилися на 4,0÷8,5%, з 1587÷1608 до 1470÷1525 кг/т.

Збільшення продуктивності та зменшення витрат коксу пов'язано зі збільшенням загальної та засвоєної теплових потужностей печі, зменшенням теплогового дефіциту чавуну.

Таблиця 1 – Показники теплової роботи ДП №3 за 6 місяців 2011 р.

Показники	Місяці					
	1	2	3	4	5	6
	04/11	05/11	06/11	08/11	09/11	10/11
Продуктивність печі, т/добу	3065	3228	3129	2959	3196	3117
Витрати дуття*, нм ³ /хв	2795/ 3337	2910/ 3452	2860/ 3379	2675/ 3174	2925/ 3384	2810/ 3280
Втрати дуття, %	16,3	15,7	15,3	15,8	13,6	14,4
Вміст кисню в дутті, %	25,0	24,9	24,8	25,0	24,9	25,2
Температура дуття, °С	974	977	972	988	990	1000
Агломерат/окатиші, %	56/44	43/57	50/50	47/53	46/54	40/60
Витрати агломерату, кг/т	950	719	841	782	772	669
Витрати окатишів, кг/т	758	950	826	867	891	1010
Вміст Fe в залізородній частині шихти, %	57,7	59,5	58,4	58,8	59,0	59,0
Витрати флюсів, кг/т	116	105	107	114	125	152
Витрати ПВП / природ. газу, кг/т / м ³ /т	0/98	0/97	0/102	0/96	0/98	0/101
Витрати природ. газу, м ³ /год	12540	13045	13300	11860	13075	13050
Витрати кокс + горіх*, кг/т	509/ 524	505/ 517	499/ 499	506/ 520	511/ 511	504/ 527
Витрати кокс. горіху, кг/т	0	0	0	0	0	9,5
Витрати коксусу*, кг/т	509/ 524	505/ 517	499/ 499	506/ 520	511/ 511	494/ 518
Витрати умовного палива*, кг/т	622/ 636	616/ 628	616/ 616	616/ 630	622/ 622	618/ 641
Витрати сумарного палива* (в кокс еквіваленті), кг/т	588/ 603	582/ 594	581/ 581	583/ 597	590/ 590	582/ 606
Вміст Si в чавуні, %	0,63	0,72	0,70	0,79	0,72	0,71
Вміст S в чавуні, %	0,027	0,024	0,025	0,015	0,018	0,020
Вихід шлаку, кг/т	392	324	331	349	355	366
Основність шлаку CaO/SiO ₂ / (CaO+MgO)/SiO ₂	1,25/ 1,38	1,25/ 1,40	1,21/ 1,39	1,27/ 1,44	1,24/ 1,43	1,23/ 1,39
Ступінь використання CO ₂ , %	43,2	44,0	42,4	44,6	42,0	44,5
rd, %	28,7	27,0	22,6	23,7	27,3	24,8
Вихід сухого колошникового газу, тис. м ³ /ч / м ³ /т	249/ 1950	261/ 1940	255/ 1955	241/ 1950	261/ 1960	252/ 1942
Температура колошникового газу, °С	300	315	325	318	323	320
Загальна теплова потужність печі, МВт	416	432	424	399	434	421
Засвоєна теплова потужність ЗР/НСТ/Піч, МВт	36/95/ 155	35/98/ 162	30/92/ 156	32/90/ 148	36/99/ 164	35/96/ 158
Тепловий дефіцит чавуну ЗР/НСТ/Піч, МДж/т	1006/ 2681/ 4363	938/ 2610/ 4322	834/ 2547/ 4299	935/ 2615/ 4315	982/ 2678/ 4428	972/ 2650/ 4380
Середня величина КВП в ЗР/НСТ/Піч	0,103/ 0,252/ 0,406	0,097/ 0,248/ 0,406	0,088/ 0,241/ 0,401	0,098/ 0,249/ 0,405	0,100/ 0,251/ 0,410	0,100/ 0,250/ 0,408
Температура фурменної зони, °С	2000	1980	1940	1975	1990	1995
Зовнішні теплові втрати, МВт / МДж/т	13,9/ 392	13,9/ 373	13,9/ 384	13,9/ 406	13,9/ 377	13,9/ 386
Витрати коксусу на компенсацію теплових втрат, кг/т	30	29	31	32	29	30
Сумарний вихід CO ₂ , кг/т	1590	1587	1595	1601	1608	1587

* числівник – розрахунок; знаменник – тех. звіт; ЗР – зона розплаву; НСТ – нижня ступінь теплообміну; Піч – піч в цілому; ** величина теплових втрат прийнята як середня для даного обсягу печей по [1]

Таблиця 2 – Показники теплової роботи ДП №3 за 6 місяців в 2020 р.

Показники	Місяці					
	1	2	3	4	5	6
Продуктивність печі, т/добу	4028	4066	4025	4203	4140	4124
Витрати дугтя*, $\text{нм}^3/\text{хв}$	3590/ 3632	3475/ 3591	3540/ 3690	3630/ 3699	3565/ 3667	3595/ 3606
Втрати дугтя, %	1,2	3,2	4,1	1,8	2,7	0,3
Вміст кисню в дугті, %	23,3	23,9	23,5	23,7	24,0	24,2
Температура дугтя, °С	1041	1041	1046	1050	1049	1049
Агломерат/окатиші, %	77/23	100/0	91/9	71/29	76/24	74/26
Витрати агломерату, кг/т	1330	1652	1485	1211	1315	1282
Витрати окатишів, кг/т	387	4	147	496	408	440
Вміст Fe в залізородній частині шихти, %	56,4	57,2	56,7	57,6	56,7	57,0
Витрати флюсів, кг/т	12,1	1,9	0,6	0	3,2	15,9
Витрати ПВП / природ. газу, $\text{кг/т} / \text{м}^3/\text{т}$	162/0	168/0	165/10	142/29	138/44	131/62
Витрати природ. газу, $\text{м}^3/\text{год}$	0	0	1640	5140	7565	10725
Витрати кокс + горіх*, кг/т	383/ 380	362/ 358	360/ 360	362/ 362	352/ 352	354/ 354
Витрати кокс. горіху, кг/т	33,3	35,2	34,8	31,9	30,5	30,6
Витрати коксу*, кг/т	349/ 347	327/ 322	325/ 325	330/ 330	321/ 321	324/ 324
Витрати умовного палива*, кг/т	538/ 538	525/ 521	533/ 533	537/ 537	542/ 542	561/ 561
Витрати сумарного палива* (в кокс. еквіваленті), кг/т	520/ 520	506/ 502	510/ 510	507/ 507	505/ 505	516/ 516
Вміст Si в чавуні, %	0,69	0,72	0,70	0,64	0,67	0,63
Вміст S в чавуні, %	0,022	0,020	0,021	0,022	0,015	0,020
Вихід шлаку, кг/т	388	356	377	339	381	391
Основність шлаку $\text{CaO/SiO}_2 / (\text{CaO}+\text{MgO})/\text{SiO}_2$	1,11/ 1,28	1,10/ 1,27	1,09/ 1,26	1,08/ 1,25	1,11/ 1,28	1,08/ 1,25
Ступінь використання CO , %	43,4	45,0	45,9	47,1	46,5	46,1
rd , %	39,1	34,7	31,4	28,9	25,5	22,8
Вихід сухого колошникового газу, $\text{тис. м}^3/\text{ч} / \text{м}^3/\text{т}$	304/ 1815	296/ 1744	301/ 1796	314/ 1794	310/ 1794	315/ 1831
Температура колошникового газу, °С	295	295	327	314	318	335
Загальна теплова потужність печі, МВт	499	496	496	514	511	519
Засосна теплова потужність ЗР/НСТ/Піч, МВт	55/124/ 196	52/119/ 187	47/116/ 187	44/117/ 192	40/114/ 187	35/111/ 185
Тепловий дефіцит чавуну ЗР/НСТ/Піч, МДж/т	1188/ 2667/ 4214	1106/ 2524/ 3966	1007/ 2488/ 4008	903/ 2413/ 3947	827/ 2370/ 3903	724/ 2321/ 3864
Середня величина КВП в ЗР/НСТ/Піч	0,129/ 0,275/ 0,430	0,126/ 0,27/ 0,419	0,115/ 0,262/ 0,417	0,103/ 0,253/ 0,408	0,093/ 0,244/ 0,397	0,081/ 0,234/ 0,385
Температура фурменної зони, °С	2095	2090	2035	2000	1975	1940
Зовнішні теплові втрати, МВт / МДж/т	18,2/ 390	21,3/ 452	20,4/ 437	17,7/ 363	15,6/ 325	15,4/ 323
Витрати коксу на компенсацію теплових втрат, кг/т	28	33	32	27	24	24
Сумарний вихід CO_2 , кг/т	1525	1480	1490	1480	1470	1475

* числівець – розрахунок; знаменник – тех. звіт; ЗР – зона розплаву; НСТ – нижня ступінь теплообміну; Піч – піч в цілому

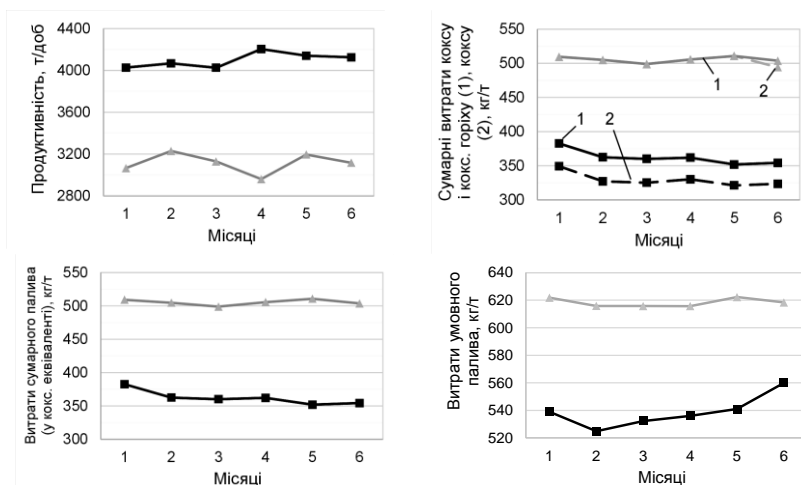


Рисунок 1 – Техніко-економічні показники ДП №3 в 2011 р. (—▲—) і 2020 р. (—■—)

На збільшення загальної і засвоєної теплових потужностей печі, головним чином, вплинуло збільшення витрат дуття на $550 \div 1120 \text{ nm}^3/\text{хв}$ і зменшення втрат дуття з $13,5 \div 16,5\%$ до $0 \div 4\%$, збільшення температури дуття на $40 \div 70 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 1-3).

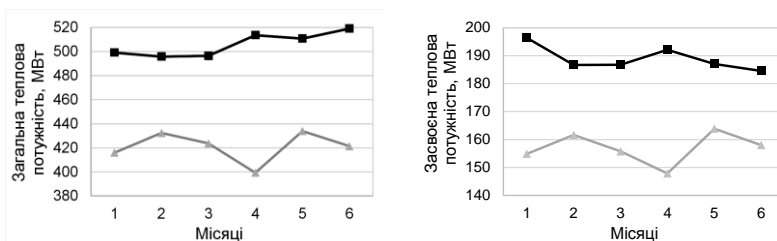


Рисунок 2 – Загальна і засвоєна теплові потужності печі ДП №3 в 2011 р. (—▲—) і 2020 р. (—■—)

Зменшення сумарних витрат коксу та коксового горішку з $500 \div 525 \text{ кг/т}$ в 2011 р. до $350 \div 380 \text{ кг/т}$ в 2020 р. досягнуто за рахунок застосування ПВП окремо та разом з природним газом, зменшенням витрат вапняку (флюсів) з $105 \div 150$ до $0 \div 16 \text{ кг/т}$. Застосування ПВП в 2020 р. в кількості $120 \div 170 \text{ кг/т}$ призвело до зменшення витрат коксу за рахунок заміни вуглецю коксу вуглецем ПВП (рис. 4). Спільно зі збільшенням витрати дуття та його температури, зменшенням втрат дуття

і збільшенням вмісту вуглецю в коксі на ~1% зменшилася витрата вуглецю коксу, що спалюється в сухому дутті (рис. 3, табл. 3).

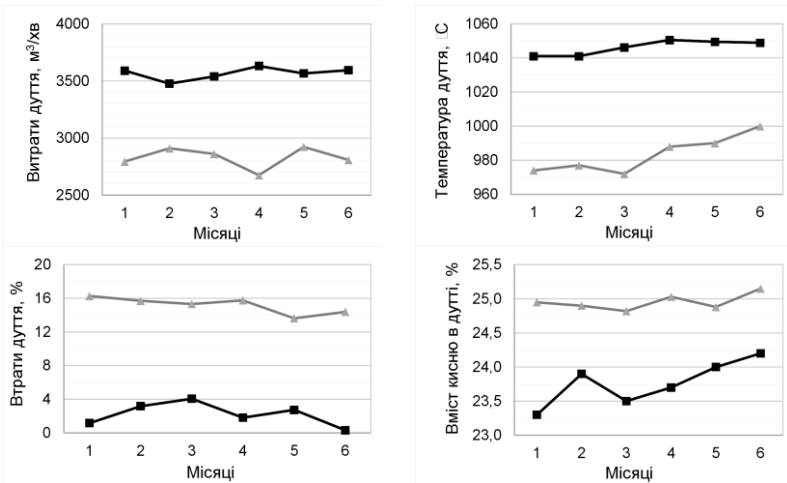


Рисунок 3 – Дуттьові параметри ДП №3 в 2011 р. (—▲—) і 2020 р. (—■—)

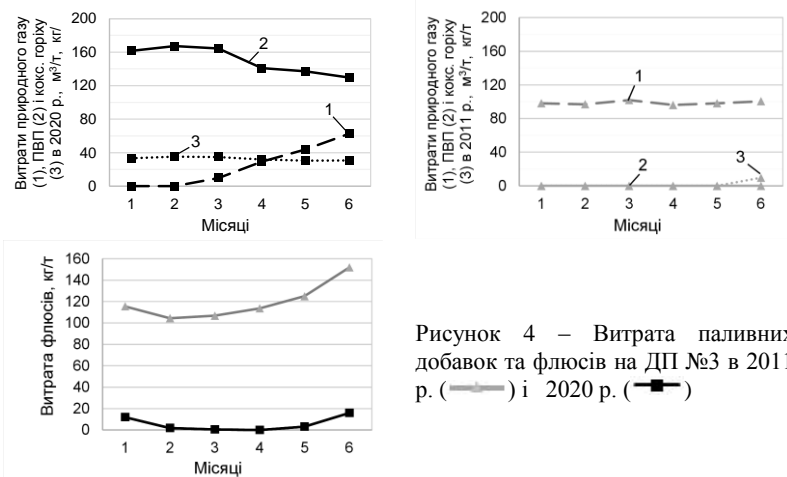


Рисунок 4 – Витрата паливних добавок та флюсів на ДП №3 в 2011 р. (—▲—) і 2020 р. (—■—)

Співставлення теплоенергетичних балансів ДП №3 показало наявність розбалансу між показниками сумарної витрати коксу та коксового горішку за розрахунком і тех. звітом до 5% (рис. 5, табл. 1-2). Наявність розбалансу може бути пов'язана з точністю обліку і контролем інформації.

Таблиця 3 – Середньомісячні витрати вуглецю коксу та коксового горіху ДП №3 за 6 місяців 2011 р. і 2020 р.

Статті витрат	Період	2011 р.	2020 р.
Питомі витрати вуглецю коксу на:			
– вуглець коксу, що спалюється в сухому дутті, кг/т		276,5	170,3
– в тому числі витрати коксу на покриття теплових витрат, кг/т		24,4	22,6
– вуглець коксу на пряме відновлення заліза, кг/т		49,1	56,6
– вуглець коксу на відновлення елементів чавуну (Si, Mn, P, V), кг/т		6,6	6,0
– вуглець коксу, який переходить в чавун, кг/т		42,5	41,4
– вуглець коксу на розкладання вологи дуття, кг/т		10,4	9,5
– вуглець на розкладання CO ₂ вапняку, кг/т		3,7	0,2
– інше споживання і втрати вуглецю, кг/т		18,4	5,9
Разом витрати вуглецю коксу, кг/т		431,7	312,5
Вміст вуглецю у коксі, %		85,3	86,5
Середньомісячні витрати коксу, кг/т		506	361

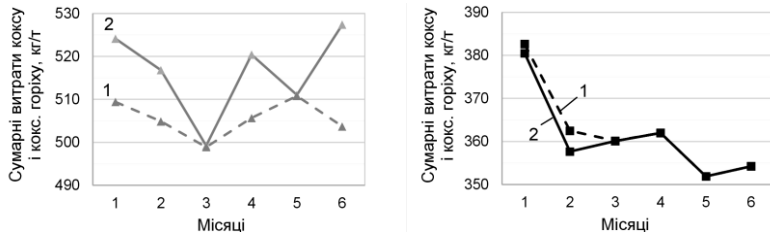


Рисунок 5 – Зіставлення сумарних витрат коксу і коксового горіху по розрахунку (крива 1) та тех. звітом (крива 2) ДП №3 в 2011 р. (—) та 2020 р. (—■—)

Тепловий дефіцит чавуну в 2020 р. в порівнянні з 2011 р. зменшився на 2÷13% (з ~4300÷4430 МДж/т до ~3850÷4200 МДж/т), що пов'язано, в основному, зі зменшенням витрат тепла на нагрівання вуглецю коксу від температури шихти на межі НСТ до температури в фурменній зоні та зменшенням витрат тепла на дисоціацію вапняку (внаслідок зменшення його витрат) при інших співставних витратах енергії, що входять в тепловий дефіцит чавуну (рис. 4, 6, табл. 4).

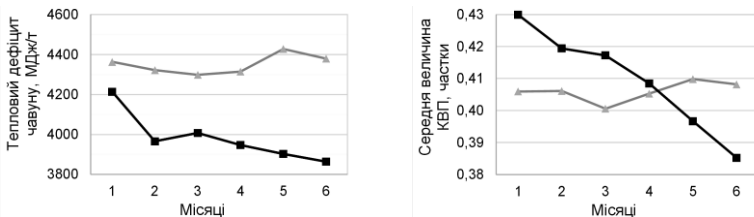


Рисунок 6 – Тепловий дефіцит чавуну та середній коефіцієнт використання палива (КВП) ДП №3 в 2011 р. (—) і 2020 р. (—■—)

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2020. – Випуск 34
 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2020. – Vypusk 34
 «Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2020. – Collection 34

Таблиця 4 – Середньомісячний мінімальний тепловий дефіцит чавуну в НСТ ДП №3 за 6 місяців в 2011 р. і 2020 р.

Статті витрат	Період	2011 р. (min-max)	2020 р. (min-max)
Витрати енергії теплового дефіциту чавуну на: (МДж/т)			
– нагрів і розплавлення чавуну		1310-1315	1297-1305
– нагрів і розплавлення шлаку		525-633	545-627
– витрати тепла на відновлення елементів чавуну		172-200	160-183
– тепло на розкладання вологи дуття		73-146	53-140
– тепло на нагрів вуглецю коксу від температури шихти на кордоні нижньої ступені теплообміну (НСТ) до температури в фурменній зоні		708-717	437-462
– витрати тепла на дисоціацію вапняку і розкладання вуглекислоти, що виділилася		148-216	0-23
– інші витрати тепла		557-678	520-603
Всього мінімальний тепловий дефіцит чавуну, МДж/т		3625-3742	3073-3277
Тепло на пряме відновлення заліза, МДж/т		580-738	588-1007
Розрахунковий тепловий дефіцит чавуну, МДж/т		4300-4428	3865-4215

Середній коефіцієнт використання палива (КВП) в 2011 р. практично не змінювався і був на рівні $\sim 0,4 \pm 0,41$. Середній КВП палива печі в 2020 р. зменшився з $\sim 0,43$ до $\sim 0,385$, що пов'язано зі спільним застосуванням з ПВП природного газу, який має негативний КВП (до $-0,1$), витрата якого поступово збільшувалася до $62 \text{ м}^3/\text{т}$ в серпні 2020 р. Зменшення середнього КВП співпадає зі збільшенням умовного палива (рис. 1, 4, 6).

Збільшення ступеня використання CO сприяло збільшенню частки виробництва чавуну за рахунок непрямого відновлення (рис. 7, 8).

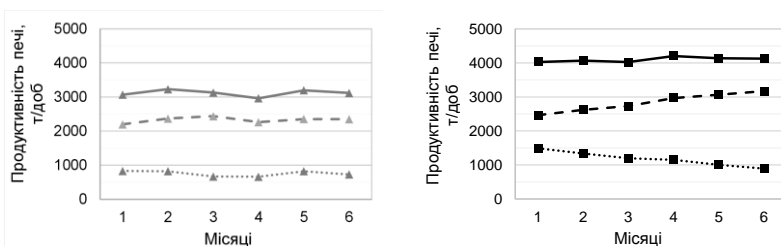


Рисунок 7 – Продуктивність ДП №3 в 2011 р. (—■—) і 2020 р. (—■—)

- — загальна кількість чавуну, т/добу;
- ▲- - кількість чавуну, отриманого від відновлення заліза воднем та CO, т/добу;
- ...■... — кількість чавуну, отриманого із заліза, відновленого твердим вуглецем і CO, що виділяється при прямому відновленні заліза, т/добу

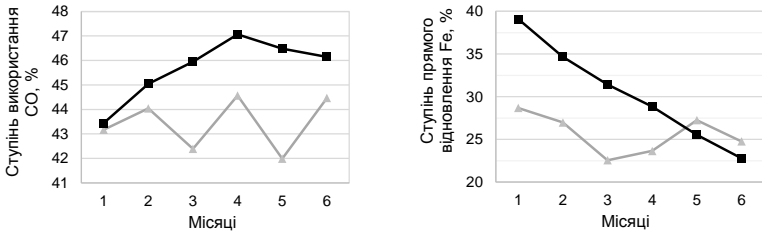


Рисунок 8 – Ступінь використання CO, ступінь прямого відновлення заліза і продуктивність ДП №3 в 2011 р. (—▲—) і 2020 р. (—■—)

Аналіз ексергетичних балансів ДП №3. З використанням результатів розрахунку теплоенергетичних балансів виконано порівняльний аналіз ексергетичним методом [1, 7, 8] ДП №3 до і після капітального ремонту.

Ексергетичний метод аналізу дозволяє оцінювати енергоефективність доменного процесу за допомогою наступних ККД [1]:

- *термодинамічна досконалість доменного процесу* – показує відношення сумарної ексергії продуктів плавки доменної плавки (ексергія витрат) до загальної кількості підведеної ексергії (ексергія приходу);

- *технологічний ККД* – показує відношення суми хімічної та фізичної ексергії чавуну до кількості підведеної ексергії;

- *узагальнений ККД виробництва чавуну* – показує відношення суми хімічної, фізичної ексергії чавуну разом з хімічною ексергією використаного колошникового газу до кількості підведеної ексергії.

Доменна піч є також і джерелом викидів в гірничо-металургійних регіонах, а енергетичні проблеми безпосередньо пов'язані з проблемами екологічними. Ексергетичний метод аналізу дозволяє оцінювати також і екологічну сторону доменного процесу для чого застосовуються наступні показники [9]:

Показник *екологічності* процесу (l) характеризує величину шкідливих впливів на навколишнє середовище (ΣZ) в розрахунку на одиницю корисної продукції (V), яка представляє собою питомі викиди всіх відходів або окремих компонентів;

Показник *ресурсоємності* процесу (n) показує витрати енергії, води, повітря, земельних та інших природних ресурсів ($\Sigma П + \Sigma W$) на одиницю корисної продукції;

Коефіцієнт екологічності об'єкту (ϵ) характеризує відношення чистого корисного ефекту до витрачених природних ресурсів.

Показники енергоефективності, які виражені в одиницях ексергії, ДП №3 за 6 місяців 2011 р. і 2020 р. приведено в таблицях 5-6.

Таблиця 5 – Ексергетичний баланс ДП №3 за 6 місяців 2011 р.

Показники	Місяці						
	1	2	3	4	5	6	
Прихід ексергії, МДж/т:							
Термічна ексергія дугтя	1382	1374	1401	1385	1395	1374	
Природний газ	фіз	14	14	14	14	14	
	хім	3777	3731	3924	3700	3778	3867
Хімічні ексергії:							
– коксу;	16291	16187	15965	16135	16306	16101	
– ПВП;	0	0	0	0	0	0	
– залізородних матеріалів;	354	243	282	257	249	269	
– вапна;	15	13	14	15	16	19	
Всього прихід ексергії	21833	21562	21601	21505	21759	21645	
Всього ексергії продуктів плавки, МДж/т:							
Чавун	фіз	900	900	900	900	900	
	хім	8122	8137	8136	8152	8137	8133
Шлак	фіз	523	432	441	465	473	488
	хім	184	152	156	164	167	172
Колошниковий газ	фіз	476	475	480	477	479	476
	хім	7396	7312	7434	7321	7495	7311
Колошниковий пил	фіз	1	1	2	1	2	2
	хім	144	144	144	144	144	144
Всього ексергії продуктів плавки	17746	17554	17693	17626	17797	17627	
Втрати ексергії	4087	4008	3907	3879	3962	4018	
Ексергетичні ККД, %:							
Термодинамічна досконалість доменного процесу	81,3	81,4	81,9	82,0	81,8	81,4	
Технологічний ККД	41,3	41,9	41,8	42,1	41,5	41,7	
Узагальнений ККД виробництва чавуну	57,3	57,9	58,2	58,0	57,8	57,3	
Екологічні показники, частки:							
Екологіємність	0,06	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	
Ресурсоемність	1,32	1,31	1,30	1,30	1,30	1,31	
Коефіцієнт екологічності	0,71	0,72	0,73	0,73	0,72	0,72	

* сума фізичної та хімічної ексергії

У 2020 р. порівнянні з 2011 р. ексергетичні ККД та екологічні показники покращилися (табл. 5-6):

- термодинамічна досконалість доменного процесу збільшилася з 81,3÷82,0 до 84,0÷84,5%;
- технологічний ККД збільшився з 41,3÷42,1 до 45,4÷47,8%;
- узагальнений ККД виробництва чавуну в цілому не змінився;
- показник ресурсоемності зменшився з ~1,31 до ~1,27;
- коефіцієнт екологічності збільшився з ~0,72 до ~0,74.

Порівняння ексергетичних балансів 2011 р. і 2020 р. показало, що термодинамічна досконалість доменного процесу збільшилася за рахунок зменшення втрат ексергії при виплавці чавуну. Технологічний ККД збільшився за рахунок зменшення сумарного приходу ексергії в ДП в 2020 р. в порівнянні з 2011 р. при співставних значеннях фізичної і хімічної ексергії чавуну. Зменшення сумарного приходу ексергії в 2020 р.

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2020. – Випуск 34
 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2020. – Vypusk 34
 «Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2020. – Collection 34

в порівнянні з 2011 р. пов'язано із застосуванням ПВП і зменшенням витрат коксу, тому що питома ексергія ПВП менше, ніж питома ексергія коксу (табл. 4-5).

Зменшення втрат ексергії пов'язано зі зменшенням різниці між сумарним приходом ексергії в ДП і сумарною ексергією продуктів плавки. Сумарна ексергія продуктів плавки в 2020 р. в порівнянні з 2011 р. зменшилася, в основному, за рахунок збільшення ступеню використання газу, і, відповідно, зменшення його хімічної енергії на виході з ДП при інших співставних значеннях ексергій продуктів плавки.

Таблиця 6 – Ексергетичний баланс ДП №3 за 6 місяців 2020 р.

Показники	Місяці	1	2	3	4	5	6
		03/20	04/20	05/20	06/20	07/20	08/20
Прихід ексергії, МДж/т:							
Термічна ексергія дуття		1345	1295	1341	1326	1321	1338
Природний газ	фіз	0	0	1	4	6	9
	хім	0	0	376	1129	1687	2401
Хімічні ексергії:							
– коксу;		12484	11827	11744	11814	11491	11567
– ПВП;		5079	5263	5173	4433	4316	4084
– залізородних матеріалів;		449	526	486	386	466	462
– вапна;		2	0	0	0	0	2
Всього прихід ексергії		19359	18912	19121	19093	19288	19862
Всього ексергії продуктів плавки, МДж/т:							
Чавун	фіз	900	900	900	900	900	900
	хім	8133	8139	8135	8120	8126	8118
Шлак	фіз	517	475	503	452	508	521
	хім	182	167	177	159	179	184
Колошниковий газ	фіз	446	436	444	447	450	457
	хім	6013	5701	5809	5910	6052	6365
Колошниковий пил	фіз	1	1	1	1	1	2
	хім	142	142	142	142	142	142
Всього ексергії продуктів плавки		16333	15962	16111	16132	16359	16688
Втрати ексергії		3026	2950	3010	2961	2929	3174
Ексергетичні ККД, %:							
Термодинамічна досконалість доменного процесу		84,4	84,4	84,3	84,5	84,8	84,0
Технологічний ККД		46,7	47,8	47,3	47,2	46,8	45,4
Узагальнений ККД виробництва чавуну		58,0	58,3	57,8	58,5	58,6	58,1
Екологічні показники, частки:							
Екологоємність		0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
Ресурсоємність		1,27	1,27	1,27	1,27	1,26	1,28
Коефіцієнт екологічності		0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,73

Висновки. Виконано порівняльний аналіз показників теплової роботи, техніко-економічних, ексергетичних та екологічних показників ДП №3 ПрАТ «МК «Азовсталь», об'ємом 1800 м³ до і після капітального ремонту. Для зіставлення обрано кращі за показниками 6 місяців в 2011 р. та 2020 р.

*«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії. – 2020. – Випуск 34
«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2020. – Vypusk 34
«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2020. – Collection 34*

Порівняльний аналіз техніко-економічних показників ДП №3 показав, що вони покращилися в 2020 р. в порівнянні з 2011 р.:

- виробництво чавуну збільшилося на 25÷42%;
- сумарні витрати коксу і коксового горіху зменшилися на 24÷33%;
- витрата умовного і сумарного палива зменшилася на 9÷19% і 10÷17% відповідно;
- сумарні викиди CO₂ зменшилися на 4,0÷8,5%.

Збільшенню продуктивності і зменшенню витрат умовного і сумарного палива в коксовому еквіваленті сприяло збільшення загальної і засвоєної теплових потужностей, які збільшилися в 2020 р. в порівнянні з 2011 р. в основному за рахунок покращенню параметрів дуття (збільшення витрат і температури дуття, зменшення витрат дуття). Зменшення сумарних витрат коксу і коксового горіха з 500÷525 кг/т в 2011 р. до 350÷380 кг/т в 2020 р. пов'язано із заміною вуглецю коксу вуглецем ПВП, яке в 2020 р. використовували в кількості до ~170 кг/т.

Порівняльний аналіз ексергетичних балансів показав, що ексергетичні та екологічні показники також покращилися в 2020 р. в порівнянні з 2011 р.:

- термодинамічна досконалість доменного процесу збільшилися на 2,0÷3,2%;
- технологічний ККД збільшився на 3,3÷6,5%;
- показник ресурсоемності зменшився з ~1,31 до ~1,27;
- коефіцієнт екологічності збільшився з ~0,72 до ~0,74.

Перелік посилань

1. *Бородулін А.В., Горбунов А.Д., В.И. Романенко, С.П. Суцев.* Домна в энергетическом измерении. – Днепродзержинск: ДГДУ, 2006. – 542 с.
2. *Степанов В.С., Степанова Т.Б.* Эффективность использования энергии – Новосибирск: Наука СО, 1994. – 256 с.
3. *Семикин И.Д., Аверин С.И., Радченко И.И.* Топливо и топливное хозяйство металлургических заводов. – М.: Металлургия, 1965. – 391 с.
4. *Ю.И. Розенгарт, Б.Б. Потапов, В.М. Ольшанский, А.В. Бородулин.* Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах. Киев: Вища школа. – 1986. – 296 с.
5. *Бородулін А.В., Семикин И.Д.* Расчет и оценка процессов прямого восстановления железа в доменной печи теплоэнергетическим методом // Изв. ВУЗов. Черн. Металлургия. – 1971. – № 2. – С. 27-30.
6. *Семикин И.Д.* Энергетические основы доменного процесса. / В сб. Дискуссия о работе доменных печей на повышенном давлении / Ред. А.Д. Готлиб и Н.С. Щиренко. – Изд. Укр. НТО ЧМ. Днепропетровск: 1958. – С. 37-39.
7. *Шаргут Я., Петела Р.* Эксергия. – М.: Энергия, 1968. – 276 с.
8. *Бродянский В.М., Фратшер В., Михалек К.* Эксергетический метод и его приложения. Под ред. Бродянского В.М. – М.: Энергоиздат, 1988. – 288 с.
9. *Большаков В.И.* Эксергетический анализ энергоэффективности применения пылеугольного топлива в доменном производстве / В.И. Большаков,

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2020. – Випуск 34
 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2020. – Vypusk 34
 «Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2020. – Collection 34

- А.Л. Чайка, А.А. Москалина // Экология и промышленность. – 2014. – № 2. – С. 87-94.
10. А.Л. Чайка. Опыт и перспективы освоения рациональной технологии доменной плавки с применением пылеугольного топлива в Украине / А.Л. Чайка, В.В. Лебедь, Б.В. Корнилов, А.А. Сохацкий, К.С. Цюпа, В.Ю. Шостак // *Металл и литье Украины*. – 2018. – № 11-12. – С. 11-19.
 11. *Heat Losses in the Cooling System and Consumption of Coke to Compensate for Them in Blast Furnaces of Various Volumes* / [A.L. Chaika, K.S. Tsyupa, V.Yu. Shostak, B.V. Kornilov, A.A. Zhrebetskii, A.A. Sokhatskii] – *Metallurgist*, July 2019, Volume 63, Issue 3-4, pp. 223-227.
 12. *Investigation of the influence of the technology of blast-furnace smelting with the use of pulverized coal fuel and natural gas on the performance indicators of blast furnaces* / [A.L. Chaika, A.A. Sokhatskii, L.E. Vasil'ev, A.V. Sushchenko, V.V. Lebed', A.A. Moskalina, B.V. Kornilov] – *Metallurgist*, March 2019, Volume 62, Issue 11-12, pp. 1201-1212.
 13. *Gas-Dynamic Stability and the Distribution of Gas Flow Rates over the Blast-Furnace Height* / [A.L. Chaika, B.V. Kornilov V.V. Lebed', A.A. Sokhatskii, V.Yu. Shostak] // *Steel in Translation*, January 2019, Volume 49, Issue 1, pp. 34-38.
 14. *Influence of Pulverized-Coal Consumption on Lining Damage, Heat Losses, and Coke Consumption in Blast Furnaces* / [A.L. Chaika, A.P. Fomenko, V.I. Naboka, K.S. Tsyupa, B.V. Kornilov] // *Steel in Translation*, August 2018, Volume 48, Issue 8, pp. 513-516.

Reference

1. Borodulin A.V., Gorbunov A.D., Romanenko V.I. & Sushchev S.P. (2006). *Domna v energeticheskom izmerenii [Blast furnace in the energy dimension]*. Dneprodzerzhinsk: DGDU, 2006, 542. [In Russian].
2. Stepanov V.S. & Stepanova T.B. (1994). *Effektivnost ispolzovaniya energii [Energy efficiency]*. Novosibirsk: Nauka SO, 1994, 256. [In Russian].
3. Semikin I.D., Averin S.I. & Radchenko I.I. (1965). *Topливо i toplivnoye khozyaystvo metallurgicheskikh zavodov [Fuel and fuel economy of metallurgical plants]*. Moskva: Metallurgiya, 1965, 391. [In Russian].
4. Rozengart Yu.I., Potapov B.B., Olshanskiy V.M. & Borodulin A.V. (1986). *Teploobmen i teplovyye rezhimy v promyshlennykh pechakh [Heat transfer and thermal conditions in industrial furnaces]*. Kyev: Vishcha shkola, 1986, 296. [In Russian].
5. Borodulin A.V. & Semikin I.D. (1971). Raschet i otsenka protsessov pryamogo vosstanovleniya zheleza v domennoy pechi teploenergeticheskim metodom [Calculation and evaluation of the processes of direct reduction of iron in a blast furnace by the heat power method]. *Izv. VUZov. Chern. Metallurgiya [Izvestiya. Ferrous metallurgy]*, 1971, 2, 27-30. [In Russian].
6. Semikin I.D. (1958). Energeticheskiye osnovy domennogo protsessa [Energy bases of the blast furnace process]. *V sb. Diskussiya o rabote domennykh pechey na povyshennom davlenii [Collection. Discussion on the operation of blast furnaces at high pressure]*. A.D. Gotlib, N.S. Shchirenko (Ed). Dnepropetrovsk: Izd. Ukr. NTO ChM, 1958, 37-39. [In Russian].

7. Shargut Ya. & Petela R. (1968). *Eksergiya [Exergy]*. Moskva: Energiya, 1968, 276. [In Russian].
8. Brodyanskiy V.M., Fratsher V. & Mikhalek K. (1988). *Eksergeticheskiy metod i ego prilozheniya [Exergetic method and its applications]*. V.M. Brodyanskiy (Ed.). Moskva: Energoizdat, 1988, 288. [In Russian].
9. Bolshakov V.I., Chayka A.L. & Moskalina A.A. (2014). Eksergeticheskiy analiz energoeffektivnosti primeneniya pyleugolnogo topliva v domennom proizvodstve [Exergy analysis of the energy efficiency of using pulverized coal fuel in blast-furnace production]. *Ekologiya i promyshlennost [Ecology and Industry]*, 2014, 2, 87-94. [In Russian].
10. Chayka A.L., Lebed V.V., Kornilov B.V., Sokhatskiy A.A., Tsyupa K.S. & Shostak V.Yu. (2018). Opyt i perspektivy osvoyeniya ratsionalnoy tekhnologii domennoy plavki s primeneniyem pyleugolnogo topliva v Ukraine [Experience and prospects of mastering the blast furnace technology using pulverized coal in Ukraine]. *Metall i litye Ukrainy [Metal and casting of Ukraine]*, 2018, 11-12, 11-19. [In Russian].
11. Chaika A.L., Tsyupa K.S., Shostak V.Yu., Kornilov B.V., Zhrebetskii A.A. & Sokhatskiy A.A. (2019). Heat Losses in the Cooling System and Consumption of Coke to Compensate for Them in Blast Furnaces of Various Volumes. *Metallurgist*, 2019, Vol. 63, 3-4, 223-227. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00815-w>
12. Chaika A.L., Sokhatskiy A.A., Vasilev L.E., Sushchenko A.V., Lebed V.V. & Moskalina A.A. et al. (2019). Investigation of the influence of the technology of blast-furnace melting with the use of pulverized coal fuel and natural gas on the performance indicators of blast furnaces. *Metallurgist*, 2019, Vol. 62, 11-12, 1201-1212. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00775-1>
13. Chaika A.L., Kornilov B.V., Lebed V.V., Sokhatskiy A.A. & Shostak V.Yu. (2019). Gas-Dynamic Stability and the Distribution of Gas Flow Rates over the Blast-Furnace Height. *Steel in Translation*, 2019, Vol. 49, 1, 34-38. <https://doi.org/10.3103/S0967091219010029>
14. Chaika A.L., Fomenko A.P., Naboka V.I., Tsyupa K.S. & Kornilov B.V. (2018). Influence of Pulverized-Coal Consumption on Lining Damage, Heat Losses, and Coke Consumption in Blast Furnaces. *Steel in Translation*, 2018, Vol. 48, 8, 513-516. <https://doi.org/10.3103/S096709121808003X>.

A.L. Chaika, PhD, Senior Researcher, Head of laboratory of heat engineering and energy-saving technologies; ORCID 0000-0003-1678-2580

B.V. Kornilov, PhD, Senior Researcher; ORCID 0000-0002-5544-3023

A.A. Moskalina, PhD, Researcher, ORCID 0000-0001-9552-2853

V.V. Lebed, PhD, Senior Researcher

M.G. Dzhigota, lead engineer

Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine

S.A. Karikov, chief of blast furnace workshop

¹PJSC «AZOVSTAL IRON & STEEL WORKS»

Heat power analysis of performance indicators blast furnace No. 3 PJSC «AZOVSTAL IRON & STEEL WORKS» with natural gas and pulverized coal after oven overhaul of blast furnace

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2020. – Випуск 34

«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2020. – Vypusk 34

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2020. – Collection 34

Summery. In 2019, according to the technological assignment of the Iron and Steel Institute (ISI), the reconstruction of the blast furnace (BF) No. 3 of PJSC «AZOVSTAL IRON & STEEL WORKS» was carried out for the long-term energy-efficient production of pig iron with using pulverized coal (PCI) up to 180 kg/t with a change in the profile according to the technological task of ISI. The design of the BF No. 3 profile corresponds to the best world solutions for furnaces efficiently working with pulverized coal, and the furnace was equipped with five mathematical models of ISI («Horn», «Mine», «Heat losses», «Loading», «Slag»). Specialists of ISI developed recommendations and carried out technological support for the operation of BF No.3, which made it possible to increase the removal of pig iron from the design 2.1 t/m³ to 2.27 t/m³ and achieved the best indicators in the blast furnace workshop in terms of coke and equivalent fuel consumption by increasing the productivity of the burden system, using a rational burden loading matrix, using a rational pressure drop in the furnace, which allows the maximum use of the power of the blower machine, forcing the furnace with technical oxygen and other measures. Using the heat power model of I.D. Semikin was made a comparative analysis of the best for six months indicators of thermal performance and technical and economic indicators of BF №3 of PJSC «AZOVSTAL IRON & STEEL WORKS», with a volume of 1800 m³ before (work with natural gas) and after major repairs (work with pulverized coal and with natural gas). Using the exergy method of analysis based on the results of calculating heat and power balances, a comparative analysis of changes in the energy efficiency and environmental indicators of BF No. 3 before and after its major repairs was carried out. It shown the expediency of integrated mastering of operating modes and modernization of the blast furnace for long-term and energy-efficient operation with pulverized coal. It disclosed the mechanism for improving the technical and economic indicators of work after major repairs by changing the heat and power conditions of the blast furnace. Its shown Improvement of exergy efficiency factor and environmental performance of BF No. 3 after major repairs.

Keywords: blast furnace, pulverized coal, natural gas, productivity, coke consumption, energy efficiency, exergy, efficiency, environmental indicators

For citation: *Chayka O.L., Kornilov B.V., Moskalyna A.O., Lebid' V.V., Dzyhyhota M.H., Karikov S.A.* Teploenerhetychnyy analiz pokaznykiv roboty DP №3 PRAT «МК «AZOVSTAL'» z pryrodnyh hazom i z PVP pislya kapital'noho remontu pechi. [Heat power analysis of performance indicators blast furnace No. 3 PJSC «AZOVSTAL IRON & STEEL WORKS» with natural gas and pulverized coal after oven overhaul of blast furnace.]. «*Fundamental'nye i prikladnye problemy čornoj metallurgii*». [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy] 2020, 34. 47-61. (In Ukrainian). DOI 10.52150/2522-9117-2020-34-47-61

*Стаття надійшла до редакції збірника 7.12.2020 року,
пройшла внутрішнє і зовнішнє рецензування.
(Протокол засідання редакційної колегії №3 від 22 грудня 2020 р.)*