



Vol. 1 No. 2 (2023)

Available since: 2023

Published: 2 times a year

Founders: State University of Economics and Technology

ISSN: 3041-1246

E-mail: [ete@duet.edu.ua](mailto:ete@duet.edu.ua) Journal homepage: <https://ete.org.ua>

JEL: L640, L710

DOI: 10.62911/ete.2023.01.02.10

## Influence chemical composition of the coal mineral substance on the thermochemical properties blast furnace coke

Citation:


Shmeltser, K., Kormer, M., & Liakhova, I. (2023) Influence chemical composition of the coal mineral substance on the thermochemical properties blast furnace coke. Scientific and practical journal "Economics and technical engineering", 1(2), 128–142.

<https://doi.org/10.62911/ete.2023.01.02.10>

Kateryna Shmeltser

*Assoc. Prof., PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine*


*e-mail: [shmeltser@duet.edu.ua](mailto:shmeltser@duet.edu.ua)*

 *ORCID iD: 0000-0001-6830-8747*

Maryna Kormer,

*Assoc. Prof., PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine*


*e-mail: [kormer@duet.edu.ua](mailto:kormer@duet.edu.ua)*

 *ORCID iD: 0000-0002-6509-0794*

Iryna Liakhova

*Assoc. Prof., PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine*

*e-mail: [liakhova\\_ia@duet.edu.ua](mailto:liakhova_ia@duet.edu.ua)*

 *ORCID iD: 0000-0001-7589-8351*

**Abstract:** The effectiveness of coke functions in the blast furnace process largely depends on its reactivity. The reactivity of coke affects the course of blast furnace smelting, especially the profile of temperature distribution and gas flows in the furnace, and the degree of gas utilization and the specific consumption of reducing agent. It is shown that the reactivity of coke depends not only on its ash content, but also on its qualitative characteristics, that is, on the total content of oxides of various types, which affect the rate of reaction of carbon with carbon dioxide. The basic equations for calculating the ash basicity index of the batch are given, which are used to quantitatively assess the influence of ash components on the thermochemical properties of coke. It has been established that by calculating the basicity index, it is possible to provide a reasonable comparative assessment and characterize the technological value of coal concentrates and batches, as well as to quickly adjust the composition of production batches. Forecasting the quality of coke based on the properties and composition of coal batches is important for the long-term planning of supplying coke plants with coal for coking and for optimizing the composition of coal batches in the production process. The various mathematical models for predicting reactivity (CRI) and coke post-reaction strength (CSR), including using the genetic characteristics of coal, the chemical composition of their mineral substance was analyzed in the article. An equation is proposed for calculating the predictive indicators of CSR and CRI based on the basicity index of the batch ash for the raw material conditions of coke plant "ArcelorMittal Kryvyi Rih". The dependences of the CSR and CRI indicators of coke on the ash basicity index  $I_0$  of the batch and on the ash basicity index of the  $И_0$  batch were constructed, taking into account the ash content and yield of volatile substances of the batch. The use of the proposed equations will allow to optimize the composition of the production coal batch and achieve an increase in the quality of coke according to the post-reaction strength (CSR) indicator by 3-3.5%.

Received: 10/09/2023

Accepted: 15/11/2023



**Keywords:** coal batch, basicity index, ash, mineral substance, reactivity of coke (CRI), coke post-reaction strength (CSR).


JEL: L640, L710

### **Influence chemical composition of the coal mineral substance on the thermochemical properties blast furnace coke**

Kateryna Shmeltser

Assoc. Prof., PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine


e-mail: shmeltser@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0001-6830-8747

Maryna Korner

Assoc. Prof., PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine


e-mail: korner@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0002-6509-0794

Iryna Liakhova

Assoc. Prof., PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: liakhova\_ia@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0001-7589-8351

**Abstract:** The effectiveness of coke functions in the blast furnace process largely depends on its reactivity. The reactivity of coke affects the course of blast furnace smelting, especially the profile of temperature distribution and gas flows in the furnace, and the degree of gas utilization and the specific consumption of reducing agent. It is shown that the reactivity of coke depends not only on its ash content, but also on its qualitative characteristics, that is, on the total content of oxides of various types, which affect the rate of reaction of carbon with carbon dioxide. The basic equations for calculating the ash basicity index of the batch are given, which are used to quantitatively assess the influence of ash components on the thermochemical properties of coke. It has been established that by calculating the basicity index, it is possible to provide a reasonable comparative assessment and characterize the technological value of coal concentrates and batches, as well as to quickly adjust the composition of production batches. Forecasting the quality of coke based on the properties and composition of coal batches is important for the long-term planning of supplying coke plants with coal for coking and for optimizing the composition of coal batches in the production process. The various mathematical models for predicting reactivity (CRI) and coke post-reaction strength (CSR), including using the genetic characteristics of coal, the chemical composition of their mineral substance was analyzed in the article. An equation is proposed for calculating the predictive indicators of CSR and CRI based on the basicity index of the batch ash for the raw material conditions of coke plant "ArcelorMittal Kryvyi Rih". The dependences of the CSR and CRI indicators of coke on the ash basicity index  $I_o$  of the batch and on the ash basicity index of the  $I_o$  batch were constructed, taking into account the ash content and yield of volatile substances of the batch. The use of the proposed equations will allow to optimize the composition of the production coal batch and achieve an increase in the quality of coke according to the post-reaction strength (CSR) indicator by 3-3.5%.


**Keywords:** coal batch, basicity index, ash, mineral substance, reactivity of coke (CRI), coke post-reaction strength (CSR).

### **Вплив хімічного складу мінеральної субстанції вугілля на термoxiмічні властивості доменного коксу**

Катерина Шмельцер

к. т. н., доцент, Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна


e-mail: shmeltser@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0001-6830-8747

Марина Кормер

к. х. н. доцент, Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна


e-mail: kormer@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0002-6509-0794

Ірина Ляхова

к.т.н., доцент, Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна

e-mail: liakhova\_ia@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0001-7589-8351

**Анотація:** Ефективність функцій коксу в доменному процесі в значній мірі залежить від його реакційної здатності. Реакційна здатність коксу впливає на перебіг доменної плавки, ступінь використання газу, питому витрату відновника. Доведено, що реакційна здатність коксу залежить не тільки від величини його зольності, а й від якісної її характеристики, тобто від сумарного вмісту оксидів різного характеру, які впливають на швидкість реакції вуглецю з вуглекислим газом. Наведено основні рівняння для обчислення індексу основності золи шихти, який використовують для кількісної оцінки впливу зольних компонентів на термохімічні властивості коксу. Встановлено, що розраховуючи індекс основності, можна надати обґрунтовану порівняльну оцінку та охарактеризувати технологічну цінність вугільних концентратів та шихт. Прогноз якості коксу на основі властивостей вугільних шихт має значення для перспективного планування забезпечення коксохімічних підприємств вугіллям і для оптимізації складу вугільних шихт. У статті проаналізовано математичні моделі прогнозу реакційної здатності (CRI) та післяреакційної міцності коксу (CSR), у тому числі з використанням генетичних особливостей вугілля, хімічного складу їх мінеральної субстанції. Запропоновано рівняння для розрахунку прогнозних показників CSR та CRI на основі індексу основності золи шихти для сировинних умов коксохімічного виробництва «АрселорМіттал Кривий Ріг». Отримані залежності показників CSR та CRI коксу від індексу основності золи шихти  $I_0$  і від індексу основності золи шихти  $I_0$  – з урахуванням зольності та виходу летючих речовин шихти. Використання запропонованих рівнянь дозволить оптимізувати склад виробничої вугільної шихти та досягти підвищення якості коксу за показником післяреакційної міцності на 3-3,5 %.

**Ключові слова:** вугільна шихта, індекс основності, зольність, мінеральна субстанція, реакційна здатність (CRI), міцність коксу після реакції (CSR).

## Вступ (Introduction)

У доменній плавці кокс виконує функції комплексного енерготехнологічного матеріалу. У процесах його перетворень у фурм виділяється основна частина необхідної для процесів плавки теплоти і утворюється основна частина відновлювального газу, до якого в горизонтах вище додається додаткова частина газу від прямого відновлення. Крім зазначених енергетичних функцій кокс виконує функцію твердого насаду в зоні розм'якшення та плавлення залізовмісних матеріалів, що забезпечує протитечію шихти та газів у печі, а також функцію регулятора газорозподілу по площі поперечного перерізу агрегату. У зв'язку з цим до якості коксу і висуваються високі вимоги (Lyalyuk et al., 2022).

Ефективність всіх технологічних функцій коксу в доменному процесі значною мірою залежить від реакційної здатності коксу, яку більшість доменників розглядає як комплексний показник його якості, пов'язаний з хімічним складом та фізико-хімічними властивостями.

В Україні через технічні умови на доменний кокс показники реакційної здатності і післяреакційної міцності були введені, починаючи з 2005 р., згідно з міжнародним стандартом ISO 18894:2006, на основі якого в Україні з 1.01.2008 був введений в дію ДСТУ 4703:2006. Це дало можливість організувати систематичний контроль якості коксу і дослідження його

властивостей за показниками CRI/CRS на спеціальних установках по методу фірми Nippon Steel Corporation.

Реакційна здатність – це сумарний показник, що характеризує швидкість протікання процесу взаємодії коксу з газами. Іноді реакційну здатність по відношенню до кисню називають горючістю, а по відношенню до діоксиду вуглецю – відновлювальною здатністю. Реакційна здатність оцінюється швидкістю утворення окису вуглецю при взаємодії двоокису вуглецю з випробуваним коксом.

У досягненні необхідних значень якісних показників коксу вирішальну роль відіграє підбір оптимальних властивостей та складу вугільної шихти. Хоча універсальні моделі умов отримання якісного коксу відсутні, ряд досліджень показує важливе значення певного рівня показників вугільної шихти за мацеральним складом, спіклівістю, складом мінеральної частини, ступенем метаморфізму, вмістом летких речовин, сірки та ін. для формування якості коксу (Diez et al., 2002).

Мінеральні компоненти шихти у процесі коксування по-різному впливають на якість коксу. Негативний вплив на характеристики міцності коксу надають компоненти підвищеної щільності  $\text{SiO}_2$  і  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , які є центрами утворення тріщин в коксі. У доменному процесі ці компоненти є баластними, оскільки потрапляючи з дрібними фракціями коксу в шлак, вони знижують рухливість і порушують розподіл газових потоків. Тому всі компоненти золи можна умовно розділити на дві групи: оксиди, що є баластними ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), і корисні в доменному процесі ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ) (Kouichi Miura et al., 1989).

Кокс з найбільш зольної шихти має більш високу реакційну здатність і меншу термомеханічну міцність. Обумовлено це каталітичним впливом на процеси газифікації оксидів деяких металів (натрію, калію, кальцію, магнію) і сульфатів, що містяться в золі. Але мінеральна частина вугілля і коксу може містити і оксиди елементів, що пригнічують реакції газифікації (наприклад, алюмінію, кремнію, титану). При підвищеному їх вмісті в мінеральній частини при рівних умовах реакційна здатність коксу може знижуватися, а термомеханічна міцність - зростати. Таким чином, на ці показники істотно впливає не тільки зольність коксу, а й хімічний склад його золи (Nag Debjani et al., 2009).

Вплив мінеральних включень на реакційну здатність коксу стосовно  $\text{CO}_2$  пов'язаний з тим, що мінеральні домішки безпосередньо беруть участь як у процесі утворення та впливають на зміни властивостей пластичної маси вугілля (формують фізико-хімічні властивості коксу і, зокрема, на його реакційну здатність), так і в реакціях окислення вуглецю коксу реагуючими газами (Miroshnichenko, 2009).

Отже, реакційна здатність коксу залежить не тільки від величини його зольності, а й від якісної її характеристики, а точніше від сумарного вмісту оксидів різного характеру, які впливають на швидкість реакції вуглецю з вуглекислим газом. Таким чином, зі зростанням кількості активуючих оксидів у золі коксу ( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}+\text{MgO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) та зменшенням оксидів, що гальмують реакцію  $\text{C}+\text{CO}_2=2\text{CO}$  ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  та  $\text{TiO}_2$ ), реакційна здатність підвищується (Xing et al., 2019; Miroshnichenko, 2009).

Для кількісної оцінки впливу зольних компонентів використовується індекс основності золи (шихти) або коксу, який є відношенням суми вмісту лужних оксидів до суми вмісту оксидів кислотного характеру. Для задовільного прогнозування CRI (CSR) коксу необхідно використовувати один з комплексних показників, який характеризує хімічний склад золи (Ulanovsky, 2007):

$$I_o = \frac{100A^d(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})}{(100 - V^{\text{daf}})(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)}, \quad (1)$$

$$I_o = \frac{\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}, \quad (2)$$

У роботі (Xing et al., 2019) проаналізовано математичні моделі прогнозу термoxiмічних властивостей коксу з урахуванням характеристики мінеральної сировини. Наводяться дані про те, що вплив оксидів металів на CSR коксу різний і його ступінь можна охарактеризувати, розташувавши компоненти таким чином:  $MgO > Fe_2O_3 > CaO > K_2O > Na_2O$ . Аналогічні висновки зроблено авторами статті (Reid et al., 2014), в якій вони наводять варіант індексу основності, що враховує ступінь впливу оксидів:

$$MMCI = \frac{100A^d(Fe_2O_3 + 1.03CaO + 0.43MgO + 2.85Na_2O + 2.34BaO + 1.9K_2O)}{SiO_2 + 0.74Al_2O_3}, \quad (3)$$

Прогноз якості коксу на основі властивостей і складу вугільних шихт має значення для перспективного планування забезпечення коксохімічних підприємств вугіллям для коксування і для коректування вугільних шихт в процесі виробництва. Існують два головні методи для рішення цієї задачі: вибір обмеженого числа параметрів коксівності вугілля, обумовлений певними уявленнями про їх вплив на властивості коксу; використання широкого набору показників властивостей вугілля і шихт.

І в першому і в другому випадках властивості вугільних шихт зіставляються з якістю коксу за допомогою математично-статистичного аналізу.

У різні роки багатьма веними були проведені дослідження та отримано математичні залежності для прогнозування якісних характеристик доменного коксу при змінному марочному складі вугільних шихт для технологічних умов конкретних коксохімічних виробництв та багатобасейнових сировинних баз. Для оптимізації складу шихт та прогнозування якості коксу розроблені різні моделі. Група моделей першого покоління фокусується на прогнозуванні показників холодної механічної міцності (тобто стабільності ASTM та індексів, отриманих при обробці коксу в барабані MICUM). Пізніші моделі другого покоління використовують як параметри якості коксу CRI і CSR. Не розроблено універсальних моделей прогнозування якості коксу, що пов'язано зі специфічними особливостями вугілля з різних вугільних басейнів, країн, континентів, які можуть різко розрізнятися за складом, будовою та властивостями.

Аналіз математичних моделей прогнозування якості коксу з урахуванням властивостей вугілля, розроблених сталеливарними компаніями та дослідницькими інститутами, показав, що більшість математичних моделей враховує коефіцієнт відбиття вітриніту та вміст інертних (фюзенизованих) компонентів, максимальну плинність та основність золи вугільної сировини (Xing et al., 2019; De Córdoba et al., 2016.).

Слід відзначити, що моделі змінювалися з часом, оскільки зазнавали змін і ринок вугілля, і методи видобутку, а також удосконалювалися технології підготовки ТГК та виробництва коксу відповідно до вимог доменної плавки. Складність також полягає в тому, що поширення набули різні методи оцінки властивостей коксу, в основі яких лежить моделювання механічного впливу, що діє на кокс у доменній печі (випробування MICUM в Україні та країнах СНД, IRSID у Європі, DI 150/30 в Японії).

Результати численних випробувань показують, що формування структури коксу, міцність якої оцінюється термoxiмікомеханічним випробуванням і виражається показником CSR, основний вплив мають: генетичні особливості вугілля, виражені петрографічними показниками і показниками пластичних властивостей органічної маси вугілля; хімічний склад мінеральної частини, насамперед наявність сполук заліза та сірки; насипна щільність вугільного завантаження; технологічні параметри коксування (час коксування та швидкість підйому температури); технологія гасіння коксу.

Аналіз літературних джерел показав (Ulanovsky, 2004; Gupta et al., 2008; Kaftan et al., 2007; Miroschnychenko et al., 2009), що багато дослідників вважають, що мінеральні складові вугілля грають важливу роль при формуванні якості коксу за показниками CRI і CSR. Отже, потужним чинником впливу на показники CSR та CRI є рівень зольності шихти і коксу.

Досвід роботи коксохімічних підприємств України свідчить, що для отримання необхідного рівня показників гарячої міцності необхідне також малосірчисте (до 1%) вугілля, що забезпечує індекс основності золи шихти  $I_o \leq 2,5$  од. або  $I_o \leq 0,2$ . Використання вугілля зі сприятливою (низькою) основністю дозволяє значно в цілому підвищити показник гарячої міцності коксу.

Авторами роботи (Miroshnychenko et al., 2009) з урахуванням даних щодо властивостей шихти та коксу України були розраховані прогнозні CSR в залежності від величини індексу основності шихти. Так, узагальнюючи результати досліджень було зроблено висновок, що збільшення індексу основності  $I_o$  на 0,1 од. обумовлює зменшення показника CSR на 9,5 %. Показник CRI при цьому збільшується на 7,5 %.

У роботі (North et al., 2018) виконано огляд факторів, що впливають на реакційну здатність коксу, наведені математичні моделі, що дозволяють прогнозувати показники реакційної здатності і післяреакційної міцності коксу для конкретних сировинних баз і умов отримання доменного коксу. Численні моделі прогнозу реакційної здатності коксу відображають переважний вплив того чи іншого фактора в конкретних умовах виконання досліджень.

В Україні для оптимізації складу шихт та прогнозування термохімічних властивостей коксу використовують рівняння (Ulanovsky, 2007):

$$CSR = 77,14 - 11,92 \cdot I_o + 0,57 \cdot I_o, \quad (4)$$

$$CRI = 13,4 + 9,35 \cdot I_o - 0,45 \cdot I_o, \quad (5)$$

Враховуючи суттєвий вплив сірки на реакційну здатність коксу, в ДП «УХІН» (Ulanovsky, 2007; Kaftan, 2007; Miroshnychenko, 2009) розроблена методика, за якою CRI коксу з вугілля з підвищеним вмістом піриту розраховують за рівнянням:

$$CRI = 14,2 + 12,4 \cdot S_t^d + 0,376 \cdot V^{daf}, \quad (6)$$

де  $S_t^d > 1$  % – масова частка загальної сірки на суху масу;  $V^{daf}$  – вихід летких речовин на суху беззолну масу, %.

Область використання вищевказаної моделі обмежена лише вугіллям з високим вмістом піриту.

Для вугілля з вмістом сірки  $S_t^d < 1$  % реакційну здатність коксу CRI обчислюють за рівнянням (Ulanovsky, 2007; Kaftan, 2007; Miroshnychenko, 2009):

$$CRI = 13,4 + 9,35 \cdot I_o - 0,45 \cdot I_o^2 \quad (7)$$

У роботі (Ulanovsky, 2004) наводяться рівняння для визначення CSR та CRI, розроблені для компанії Dofasco (Канада), з використанням індексу основності без урахування зольності шихти та виходу летких речовин:

$$CSR = 83,217 - 167,8 \cdot I_o + 147,81 \cdot I_o^2 \quad (8)$$

$$CRI = 3,5 + 160,42 \cdot I_o - 141,32 \cdot I_o \quad (9)$$

Співробітниками ДП «УХІН» (Miroshnychenko, 2009) розроблена методика, за якою CRI коксу з вугілля з підвищеним вмістом піриту розраховують за рівнянням:

$$CRI = 14,2 + 12,4 \cdot S_t^d + 0,376 \cdot V^{daf}, \quad (10)$$

де  $S_t^d > 1\%$  – масова доля загальної сірки;  $V^{daf}$  – вихід летючих речовин на суху беззольну масу, %.

Використання цієї моделі дуже привабливе, оскільки параметри  $S_t^d$  і  $V^{daf}$ , які використані для прогнозування, визначають в кожну зміну при технічному аналізі вугільної шихти, проте область використання цієї моделі обмежена тільки вугіллям з високим вмістом піриту.

Для вугілля з  $S_t^d < 1\%$  CRI коксу знаходять з рівняння:

$$CRI = 13,4 + 9,35 \cdot I_0 - 0,45 \cdot I_0^2, \quad (11)$$

де  $I_0$  - індекс основності золи вугілля (шихти).

Причому  $I_0$  розраховують за рівнянням (1), допускаючи, що під час коксування шихти не змінюється співвідношення в золі основних і кислих оксидів, а її зольність збільшується завдяки тільки видалення утворених летючих речовин і не залежить від складу мінеральних компонентів.

Показник CSR розраховують за узагальненим рівнянням:

$$CSR = 94,23 - 1,275 \cdot CRI, \quad (12)$$

або

$$CSR = 77,14 - 11,92 \cdot I_0 + 0,57 \cdot I_0^2, \quad (13)$$

Враховуючи аналітичний аналіз існуючих моделей для прогнозування термодімічних властивостей коксу, актуальним є розробка нових моделей прогнозування показників CSR та CRI з прогнозуючим параметром – основністю шихти – для умов коксохімічного виробництва ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

## Матеріали та методи (Materials and Methods)

Дослідження проводили в умовах коксохімічного виробництва «Арселор Міттал Кривий Ріг». Вихідні дані про варіантний склад дослідних вугільних шихт, якість вугільних концентратів та хімічний склад золи наведені у таблицях 1-3.

**Таблиця 1.** Варіанти дослідних вугільних шихт

Варіант шихти	Доля участі в шихті (%) вугілля марки								
	Київська Ж	Північна К	Східна К+КЖ	Свято-Варвар'їнська К	Печерська 2Ж	IV Integrity	Shoal Creek Esperance	Toms Run	Jas Mos
1	5	14	32	18	7	10	14	0	0
2	5	14	32	18	7	10	14	0	0
3	5	8	30	23	8	8	6	12	0
4	5	8	28	20	8	8	6	12	5
5	5	5	25	16	5	6	15	12	11
6	5	7	32	10	6	0	22	5	6
7	5	7	32	10	6	0	22	5	6
8	5	7	32	10	6	0	22	5	6

9	5	7	32	10	6	0	22	5	6
10	5	7	32	10	0	0	24	7	6
11	5	7	23	11	0	0	30	5	7
12	6	7	21	14	11	0	15	10	8
13	4	9	15	14	20	0	8	14	10
14	4	9	15	14	20	0	8	14	10
15	10	9	15	12	20	0	8	16	10
16	10	9	15	12	18	0	8	16	10
17	7	10	15	8	13	0	18	18	11
18	7	10	15	8	13	0	18	18	11
19	0	10	15	8	18	0	18	20	11

**Таблиця 2.** Якість вугільних концентратів

Марка вугілля	$W_t^r, \%$	$A^d, \%$	$S_t^d, \%$	$V^{daf}, \%$	$R_o, \%$	$y, \text{мм}$
Печерська 2Ж	8,0	8,8	0,65	32,5	0,97	21
Північна К	10,9	9,6	0,54	22,8	1,23	17
Київська Ж	11,3	8,6	1,88	31,2	1,12	27
Східна К+КЖ	10,5	11,2	0,83	26,8	1,15	17
Свято-Варваринська К	8,0	8,2	0,72	28,3	1,21	15
HV Integrity	6,7	7,1	0,89	34,9	0,94	23
Shoal Creek Esperance	8,4	10,0	0,80	30,6	1,09	24
Toms Run	9,2	9,3	1,3	28,6	1,14	27
Jas Mos (Poland)	8,7	6,3	0,38	20,4	1,46	15

**Таблиця 3.** Хімічний склад золи вугільних концентратів

Оксид	Вміст оксидів в золі вугілля, %									
	Київська Ж	Північна К	Східна К+КЖ	Свято-Варваринська К	Печерська 2Ж	HV Integrity	Shoal Creek Esperance	Toms Run	Jas Mos	
SiO <sub>2</sub>	42,4	57,7	54,0	51,1	58,6	50,4	52,9	50,1	42,5	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,1	15,92	33,5	37,2	28,2	32,6	35,0	31,3	33,2	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24,3	9,06	5,51	5,6	7,09	7,96	5,80	10,27	10,22	
MgO	0,85	1,94	1,13	1,18	1,47	1,47	0,89	0,69	1,71	
CaO	1,1	3,6	1,4	0,01	1,5	2,2	0,78	2,1	3,7	
Na <sub>2</sub> O	1,64	0,91	0,91	1,25	0,98	0,62	0,63	0,37	1,23	
K <sub>2</sub> O	2,37	2,33	1,79	3,44	1,51	2,77	2,60	2,41	1,8	
MnO	0,099	0,028	0,023	0,063	0,022	0,103	0,016	0,02	0,17	
SO <sub>3</sub>	0,57	1,4	0,44	0,2	0,45	0,6	0,21	0,66	1,1	
P <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,16	0,13	0,38	0,15	0,326	0,22	0,61	0,40	0,25	
TiO <sub>2</sub>	1,12	-	1,56	1,28	1,57	1,56	1,57	1,42	1,35	
ZnO	0,011	0,043	0,045	0,054	0,016	0,025	0,017	0,04	0,019	

Показники якості вугільної шихти, а також індекси основності, розраховані за формулами (1) та (2) для кожної марки вугілля і як покомпонентний адитивний показник для варіантів вугільних шихт, представлені в табл. 4.



Таблиця 4. Якість вугільної шихти

Варіант шихти	$W_t^d, \%$	$A^d, \%$	$S_t^d, \%$	$V^{daf}, \%$	$R_o, \%$	y, мм	$I_o$	$I_o$
1	9,3	9,6	0,81	28,5	1,13	19,0	2,135	0,159
2	9,3	9,6	0,81	28,5	1,13	19,0	2,135	0,159
3	9,2	9,4	0,87	28,6	1,13	19,5	2,120	0,161
4	9,2	9,3	0,85	28,2	1,15	19,4	2,150	0,166
5	9,1	9,2	0,84	27,9	1,16	19,8	2,167	0,168
6	9,3	9,6	0,83	27,9	1,15	19,8	2,157	0,162
7	9,3	9,6	0,83	27,9	1,15	19,8	2,157	0,162
8	9,3	9,6	0,83	27,9	1,15	19,8	2,157	0,162
9	9,3	9,6	0,83	27,9	1,15	19,8	2,157	0,162
10	9,4	9,7	0,86	27,7	1,16	20,0	2,200	0,164
11	9,1	9,4	0,85	27,9	1,16	20,3	2,164	0,166
12	9,1	9,2	0,84	28,0	1,16	20,1	2,211	0,173
13	9,0	9,0	0,80	28,0	1,15	20,0	2,188	0,175
14	9,0	9,0	0,80	28,0	1,15	20,0	2,188	0,175
15	9,3	9,1	0,87	28,2	1,15	20,5	2,383	0,188
16	9,3	9,1	0,88	28,1	1,15	20,5	2,405	0,190
17	9,3	9,2	0,86	27,9	1,16	20,9	2,310	0,181
18	9,3	9,2	0,86	27,9	1,16	20,9	2,310	0,181
19	9,1	9,2	0,78	27,9	1,15	20,6	2,093	0,164

Для оцінки складу та властивостей вугілля (шихти) використовували наступні стандартизовані методи:

– ДСТУ 4096-2002 “Вугілля буре, кам’яне, антрацит, горючі сланці та вугільні брикети. Методи відбору та підготовки проб до лабораторних випробувань”;

– ДСТУ 3528-97 (ISO 334-92) “Паливо тверде мінеральне. Визначення загальної сірки. Метод Єшка”;

– ДСТУ 7722:2015 “Вугілля кам’яне. Метод визначення пластометричних показників”;

– ISO 1171-97 “Solid mineral fuels. Methods for determination of ash”;

– ISO 589-81 “Hard coal - Determination of total moisture”;

– ISO 7404-3-84 “Methods for the petrographic analysis of bituminous coal and anthracite - Part 3: Method of determining maceral group composition”;

– ISO 7404-5-85 “Methods for the petrographic analysis of coals - Part 5: Method of determining microscopically the reflectance of vitrinite”;

– ДСТУ 9045:2020 “Паливо тверде. Методи визначення хімічного складу золи”.

Результати ящикового коксування використовували для визначення виходу коксу з вугільних концентратів та оцінки його якісних показників. Для проведення ящикового коксування партії вугілля масою 5-6 кг, відібрані згідно з ДСТУ 4096–2002, завантажували в металеві ящики розмірами 200×200×300 мм. Необхідну насипну щільність вугільних партій досягали триразовим струшуванням ящиків об тверду поверхню. Ящики з вугільною шихтою накривали зверху паперовою підкладкою, а потім кришками, які зверху закріплювали стрижнями. Період коксування склав 22,00 години, фактична температура в контрольних вертикалах: з машинної сторони – 1167 °С, а з коксової сторони – 1174 °С. Після коксування супутники були погашені, розкриті. Кокс був висипаний на дека та висушений в сушильні шафі до постійної ваги.

Визначення реакційної здатності та післяреакційної міцності здійснювали за стандартизованою методикою ДСТУ 4703:2006 “Кокс. Метод визначення індексу реакційної здатності коксу (CRI) і міцності залишку коксу після реакції (CSR) (ISO 18894:2006, МОД)”.

**Результати (Results)**

Для 19 варіантів вугільної шихти проводилися дослідно-промислові ящичні коксування з наступним визначенням показників реакційної здатності та післяреакційної міцності за методом фірми Nippon Steel Corporation. Результати дослідних ящичкових коксувань вугільної шихти наведено у таблиці 5.

**Таблиця 5.** Результати ящичних коксувань, %

Варіант шихти	$W_t^r, \%$	$A^d, \%$	$S_t^d, \%$	$V^{daf}, \%$	CSR, %	CRI, %
1	4,8	12,4	0,68	0,5	51,0	35,0
2	3,6	12,3	0,71	0,6	51,7	33,8
3	4,3	12,4	0,72	0,6	51,9	32,6
4	4,2	12,2	0,75	0,5	50,1	35,1
5	3,8	12,0	0,74	0,5	52,5	33,2
6	4,4	12,1	0,72	0,5	50,4	36,6
7	4,4	12,0	0,72	0,6	52,5	34,5
8	4,0	11,9	0,69	0,6	53,8	32,1
9	4,3	12,0	0,69	0,6	52,4	32,5
10	3,6	12,0	0,70	0,6	50,7	32,8
11	4,0	11,8	0,74	0,5	52,8	32,0
12	4,0	11,8	0,74	0,6	52,1	34,1
13	3,4	11,8	0,73	0,5	53,5	32,3
14	3,4	11,9	0,72	0,6	53,6	32,6
15	3,7	11,6	0,76	0,5	52,6	35,8
16	4,1	11,6	0,77	0,5	52,7	33,9
17	3,7	11,5	0,75	0,5	50,8	31,9
18	4,8	11,8	0,72	0,6	53,2	33,9
19	3,9	11,7	0,5	0,71	53,3	31,9

Необхідно відзначити, що на коксохімічному виробництві ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» в якості прогнозних показників використовують розрахункові показники CSR та CRI коксу, як адитивні величини показників CSR і CRI коксових залишків ящичкових коксування різних марок вугілля, що входять до складу шихти, що визначаються NSC-методом. Для 19 варіантів досліджуваних шихт такі показники наведені як прогнозовані в таблиці 6.

**Таблиця 6.** Розрахункові дані показників CSR і CRI

Варіант шихти	Показники якості, %					
	Прогнозні (адитивні величини)		Розрахункові за моделями (7), (8)		Розрахункові за моделями (11), (13)	
	CSR	CRI	CSR	CRI	CSR	CRI
1	49,96	34,68	60,28	25,43	54,26	31,31
2	49,96	34,68	60,28	25,43	54,29	31,31
3	49,50	33,63	59,86	25,83	54,30	31,20
4	47,52	34,33	59,43	26,43	54,15	31,42
5	47,95	33,61	59,20	26,46	53,99	31,55
6	49,21	34,32	59,69	25,99	54,08	31,47
7	49,21	34,32	59,69	25,99	54,08	31,47
8	49,21	34,32	59,69	25,99	54,08	31,47

9	49,21	34,32	59,69	25,99	54,08	31,47
10	49,21	34,32	59,67	26,01	53,67	31,79
11	48,72	34,19	59,43	26,24	54,01	31,53
12	48,84	34,17	58,62	27,02	53,57	31,87
13	47,59	34,79	58,38	27,25	53,79	31,70
14	47,35	35,04	58,38	27,25	53,79	31,70
15	47,35	35,04	56,90	28,66	51,97	33,13
16	46,13	35,71	56,67	28,88	51,77	33,28
17	47,18	34,78	57,69	27,91	52,65	32,60
18	47,18	34,78	57,69	27,91	52,65	32,60
19	48,46	33,91	59,67	26,01	54,69	31,00

У даній роботі виконані розрахунки показників реакційної здатності CRI і післяреакційної міцності коксу CSR за математичними моделями (8) і (9), де в якості визначальних параметрів використовується індекс основності без урахування зольності і виходу летких речовин шихти (2) і рівняння з індексом основності шихти, що визначається за формулою (1), тобто математичні моделі (11) та (13). Дані розрахунку зведено до таблиці 6.

На основі отриманих даних побудовані залежності показників реакційної здатності та післяреакційної міцності коксу (розраховані за відомими моделями, прогнозовані показники як адитивні покомпонентні величини і досвідчені, отримані в результаті ящикного коксування) від індексу основності золи  $I_0$  шихти (рис.1, рис.2), і від індексу основності золи шихти  $I_0$  – з урахуванням зольності та виходу летючих речовин шихти (рис. 3, рис.4).

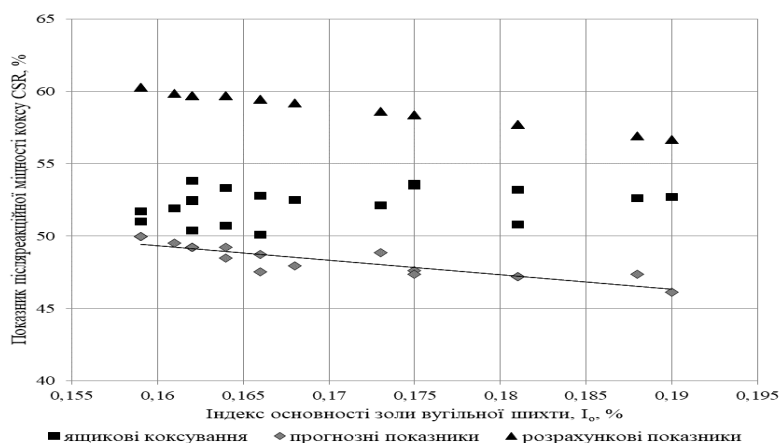


Рисунок 1. Залежність показника CSR від індексу основності золи  $I_0$  шихти

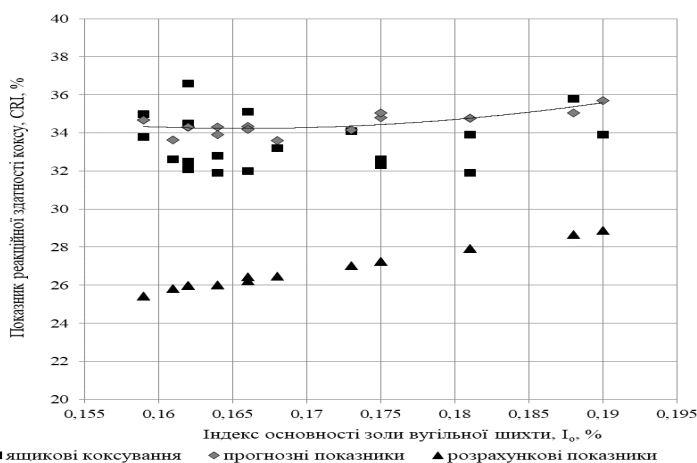
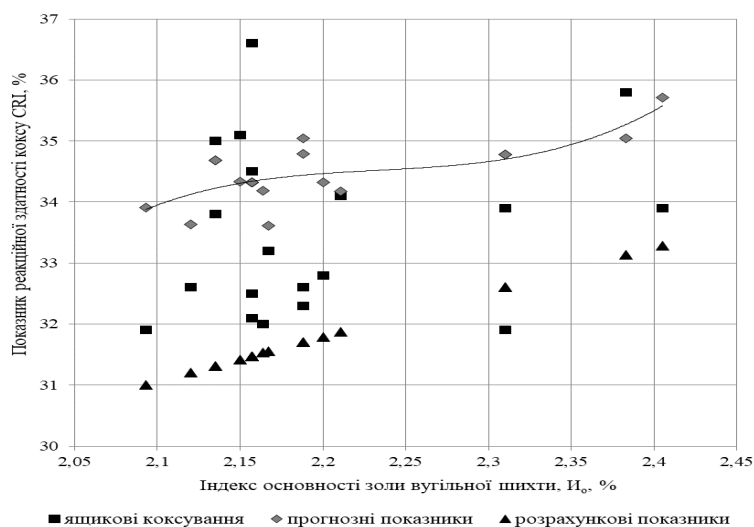
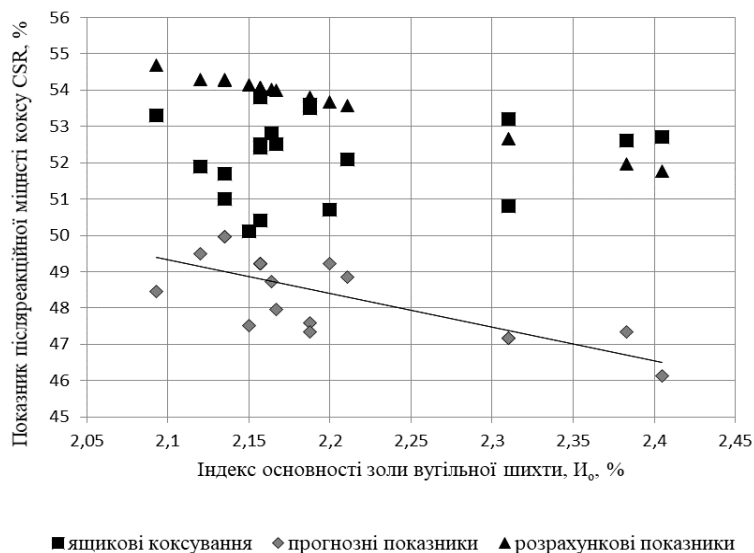


Рисунок 2. Залежність показника CRI від індексу основності золи  $I_0$  шихти



**Рисунок 3.** Залежність показника CRI від індексу основності золи  $I_0$  шихти



**Рисунок 4.** Залежність показника CSR від індексу основності золи  $I_0$  шихти

Аналіз наведених залежностей показав:

- величини показників CSR і CRI, розраховані за моделями (14) і (15) з використанням індексу основності золи шихти ( $I_0$ ) без урахування зольності та виходу летючих речовин шихти, значно (близько 10 %) відрізняються від прогнозних та дослідних показників;
- величини показників CSR та CRI, розраховані за моделями (11) та (13) з використанням індексу основності золи шихти ( $I_0$ ) з урахуванням зольності та виходу легких речовин шихти, близькі до дослідних показників;
- кореляція між отриманими показниками CSR та CRI коксу ящиківих коксувань та індексами основності золи шихти відсутня;
- прогнозні показники CSR та CRI близькі до показників, отриманих при ящиківих коксуваннях;
- залежності прогнозних показників CSR і CRI від індексу основності золи шихти без урахування зольності і виходу легких речовин шихти добре апроксимуються наступними рівняннями регресії:

$$CSR = -100,4 \cdot I_0 + 65,42; R^2 = 0,80; (14)$$

$$CRI = 2275 \cdot I_0^2 - 753,7 \cdot I_0 + 96,66; R^2 = 0,6; (15)$$

– залежності прогнозних показників CSR і CRI від індексу основності золи шихти з урахуванням зольності і виходу летких речовин шихти апроксимуються рівняннями регресії з більш низькими значеннями індексів апроксимації:

$$\text{CSR} = -9,285 \cdot I_0 + 68,82, R^2 = 0,55; (16)$$

$$\text{CRI} = 158,8 \cdot I_0^3 - 1064 \cdot I_0^2 + 2377 \cdot I_0 - 1737, R^2 = 0,58. (17)$$

З вище наведеного випливає, що прогнозувати показників CSR і CRI в умовах коксохімічного виробництва ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» доцільно з використанням моделей (14) і (15), отриманих на основі кореляційно-регресійного аналізу залежностей адитивних покомпонентно величин CSR і CRI вугільних шихт від індексу основності золи без урахування зольності і виходу летючих шихти. При цьому виключаються численні експерименти по визначенню CSR і CRI коксових залишків кожної марки вугілля, отриманих ящичним коксуванням, NSC-методом і спрощуються розрахунки. Для підвищення достовірності розрахункових показників необхідно коригувати дані моделі, періодично поповнюючи базу даних по хімічному складу використовуваних вугільних концентратів і компонентних величин CSR і CRI, що визначаються NSC-методом.

### **Висновки (Conclusions)**

Отже, враховуючи індекс основності, можна надати обґрунтовану порівняльну оцінку та охарактеризувати технологічну цінність вугільних концентратів та шихт, а також оперативно корегувати склади виробничих шихт. А використання запропонованих рівнянь, у свою чергу, дозволяє оптимізувати склад виробничої вугільної шихти та досягти підвищення якості коксу за показником післяреакційної міцності (CSR) на 3-3,5 %. Індекс основності золи  $I_0$  повинен бути на рівні 0,20-0,22.

На основі отриманих даних побудовані залежності показників CSR та CRI коксу від індексу основності золи  $I_0$  шихти і від індексу основності золи шихти  $I_0$  – з урахуванням зольності та виходу летючих речовин шихти.

Рекомендовано прогнозувати показники CSR і CRI в умовах коксохімічного виробництва ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» з використанням розроблених моделей, отриманих на основі кореляційно-регресійного аналізу залежностей адитивних покомпонентних величин CSR і CRI вугільних шихт від індексу основності золи без урахування зольності і виходу летючих шихти. Для підвищення достовірності розрахункових показників необхідно коригувати дані моделі, періодично поповнюючи базу даних по хімічному складу використовуваних вугільних концентратів і компонентних величин CSR і CRI, що визначаються NSC-методом.

### **Конфлікт інтересів (Conflicts of interest)**

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

### **Фінансування (Funding)**

Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування.

### **Внесок авторів (Authors contribution)**

Концептуалізація, Ш. К.; методика, К.М.; програмне забезпечення, Ш.К.; перевірка, Л.І. та К.М.; формальний аналіз, Л.І.; ресурси, Ш.К.; аналітичні дані, Л.І.; візуалізація, К.М.;

нагляд, Ш.К.; адміністрація проєкту, Ш.К. Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

## Література (References)

- De Córdova, M., Madias, J., Barreiro, J. (2016). Review of modeling of coal blends for prediction of coke. *Contruicao tecnica ao 46 Seminario de Reducao de Minerio de Ferro e Materias-primas*, Rio de Janeiro, Brasil.  
[https://www.academia.edu/31035308/Review\\_of\\_modeling\\_of\\_coal\\_blends\\_for\\_prediction\\_of\\_coke\\_quality](https://www.academia.edu/31035308/Review_of_modeling_of_coal_blends_for_prediction_of_coke_quality)
- Diez, M.A., Alvarez, R., Barriocanal, C. (2002). Coal for metallurgical coke production: predictions of coke quality and future requirements for cokemaking. *Int J Coal Geol*, 50(1–4), 389–412.  
[https://doi.org/10.1016/S0166-5162\(02\)00123-4](https://doi.org/10.1016/S0166-5162(02)00123-4)
- Gupta, S. et al. (2008). Minerals and iron-making reactions in blast furnaces. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34, 155–197. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2007.04.001>
- ISO 1171-97 “Solid mineral fuels. Methods for determination of ash”;  
[http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id\\_doc=71354](http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id_doc=71354)
- ISO 589-81 “Hard coal - Determination of total moisture”;  
[http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=77963](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=77963)
- ISO 7404-3-84 “Methods for the petrographic analysis of bituminous coal and anthracite - Part 3: Method of determining maceral group composition”;  
[http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=9513](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=9513)
- ISO 7404-5-85 “Methods for the petrographic analysis of coals - Part 5: Method of determining microscopically the reflectance of vitrinite”; [http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id\\_doc=71367](http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id_doc=71367)
- Kaftan, Yu.S, Droznyk, I.D., Miroshnychenko, D.V. et al. (2007). The relationship between the organic and mineral parts of the coal batch and the "cold" and "hot" coke density. *Journal of Coal Chemistry*, 3–4, 3–13. <https://www.ukhin.org.ua/vuhlekhimichnyi-zhurnal/arkhiv-nomeriv.html>
- Kouichi Miura, Kenji Hashimoto, Peter L. Silveston. (1989). Factors affecting the reactivity of coal chars during gasification, and indices representing reactivity. *Fuel*, 68(11), 1461-1475.  
[https://doi.org/10.1016/0016-2361\(89\)90046-X](https://doi.org/10.1016/0016-2361(89)90046-X)
- Lyalyuk, V.P, Shmeltser, E.O., Kassim, D.A. (2022). Improving the technology production of coke for blast furnace smelting. Octan Print, Praga, 197. <https://doi.org/10.46489/ITTPOC-229>
- Miroshnichenko, D.V. (2009). Preliminary estimation of coke’s CRI and CSR values on the basis of the physical properties of coal ash. *Coke Chem*; 51(11), 447–50.  
<https://doi.org/10.3103/S1068364X08110057>
- Miroshnychenko, D.V., Martynova, A.Yu., Golovko, M.B. (2009). On the relationship between the CRI and CSR indicators of coke and the value of the actual density of the ash of the batch. *Journal of Coal Chemistry*, 5–6, 30–35. <https://www.ukhin.org.ua/vuhlekhimichnyi-zhurnal/arkhiv-nomeriv.html>
- Nag Debjani, Haldar S.K., Choudhary P.K. and Banerjee P.K. (2009) 'Prediction of Coke CSR from Ash Chemistry of Coal Blend', *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 29(5), 243 – 250. <https://doi.org/10.1080/19392690903218117>
- North, L., Blackmore, K., Nesbitt, K., Mahoney, M.R. (2018). Models of coke quality prediction and the relationships to input variables: A review. *Fuel*, 219, 446–466.  
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.01.062>
- Reid, M.H., Mahoney, M.R., Monaghan, B.J. (2014). A coke analogue for the study of the effects of minerals on coke reactivity. *ISIJ International*, 54(3), 628–633.  
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.628>
- State standard of Ukraine 3528-97 (ICO 334-92) “Паливо тверде мінеральне. Визначення загальної сірки. Метод Єшка”. [http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id\\_doc=78878](http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id_doc=78878)

- State standard of Ukraine 4096–2002 “Brown coal, hard coal, anthracite, combustible shale and coal briquettes. Methods of sample selection and preparation for laboratory tests. [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=73491](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=73491)
- State standard of Ukraine 4703:2006 “Coke. Method for determining coke reactivity index (CRI) and strength of coke residues after reaction (CSR) (ICO 18894:2006, МОД)”. [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=99698](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=99698)
- State standard of Ukraine 7722:2015 “Hard coal. Method of Determining Plastometric Characteristics”. [http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id\\_doc=62179](http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id_doc=62179)
- State standard of Ukraine 9045:2020 “Solid fuel methods for determination of chemical composition of ash”. [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=90543](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=90543)
- Ulanovsky, M.L., Miroshnychenko, D.V. (2007). Influence of the mineral components of coal on coke quality (CRI and CRS). *Coke Chem*; 50(4), 94-98. <https://doi.org/10.3103/S1068364X07040035>
- Xing, X., Rogers, H., Zulli, P., Hockings, K., Ostrovski, O. (2019). Effect of coal properties on the strength of coke under simulated blast furnace conditions. *Fuel*, 237, 775–785. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.10.069>