



Vol. 1 No. 1 (2023)

Available since: 2023

Published: 2 times a year

Founders: State University of Economics and Technology

ISSN: 3041-1246

E-mail: cte@duet.edu.ua Journal homepage: <https://cte.org.ua>

JEL: C01, C15, C2

DOI: 10.62911/ete.2023.01.01.08

Impact of crusher type on coal raw material quality

Citation:


Shmeltser, K., Kormer, M., & Dats, N. (2023). Impact of crusher type on coal raw material quality. Scientific and practical journal "Economics and technical engineering", 1(1), 103–114.

<https://doi.org/10.62911/ete.2023.01.01.08>

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 Kormer,

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


e-mail: kormer@duet.edu.ua

 ORCID iD: 0000-0002-6509-0794

Natalia Dats

Laboratory assistant, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: n.o.dats@i.ua

 ORCID iD: 0000-0003-1963-7020

Abstract: The suitability of coal charge for coking depends significantly on the level of its grinding. At the same time, the quality of the charge deteriorates both large pieces and small ones. The most valuable from this point of view are the 3-0.5 mm size classes. The charge, consisting of coal grains of different sizes and stages of metamorphism, should be thoroughly mixed according to the amount of loading. At the same time, at each point of the volume, the charge will have the same technological properties, which will cause the same parameters of the plastic layer as it advances in a well-averaged loading and the same properties of the coke volume of the piece. Adjusting the optimal particle size distribution of the charge is the most effective method of improving the quality of blast furnace coke, which is very important in the future due to the decrease in the sintering ability of the coal charge, as the share of Zh and K coals in the charge decreases. Regulation of the optimal granulometric composition of the charge is the most effective method of improving the quality of blast furnace coke, this is very important in the future in connection with the decrease in the sintering ability of the coal charge, as the proportion of Z and K coal in the charge decreases. The laboratory study analyzed the effect on the particle size distribution of the coal charge of the design of crushing equipment: models of roller, jaw, impact, hammer, and disintegrator crushers. To obtain a charge with an optimal particle size distribution, it is rational to use selective crushing of only a large part of the charge. This can be achieved by using rotary crushers, in which small fractions pass through the crushing chamber in transit, i.e. without interaction with the working body. To optimize the crushing process, we propose to increase the number of revolutions in a rotary crusher by 20 %, since the result of crushing in a rotary crusher is closest to the optimal one. We also propose an adjusted crushing criterion, which takes into account that the optimal content of the (-0.5) mm fraction.

Received: 10/09/2023

Accepted: 25/10/2023

Keywords: coal charge, crusher, coke, granulometric size, crushing criterion




JEL: C01, C15, C2

Impact of crusher type on coal raw material quality

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

Natalia Dats

Laboratory assistant, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: n.o.dats@i.ua

 ORCID iD: 0000-0003-1963-7020

Abstract: The suitability of coal charge for coking depends significantly on the level of its grinding. At the same time, the quality of the charge deteriorates both large pieces and small ones. The most valuable from this point of view are the 3-0.5 mm size classes. The charge, consisting of coal grains of different sizes and stages of metamorphism, should be thoroughly mixed according to the amount of loading. At the same time, at each point of the volume, the charge will have the same technological properties, which will cause the same parameters of the plastic layer as it advances in a well-averaged loading and the same properties of the coke volume of the piece. Adjusting the optimal particle size distribution of the charge is the most effective method of improving the quality of blast furnace coke, which is very important in the future due to the decrease in the sintering ability of the coal charge, as the share of Zh and K coals in the charge decreases. Regulation of the optimal granulometric composition of the charge is the most effective method of improving the quality of blast furnace coke, this is very important in the future in connection with the decrease in the sintering ability of the coal charge, as the proportion of Z and K coal in the charge decreases. The laboratory study analyzed the effect on the particle size distribution of the coal charge of the design of crushing equipment: models of roller, jaw, impact, hammer, and disintegrator crushers. To obtain a charge with an optimal particle size distribution, it is rational to use selective crushing of only a large part of the charge. This can be achieved by using rotary crushers, in which small fractions pass through the crushing chamber in transit, i.e. without interaction with the working body. To optimize the crushing process, we propose to increase the number of revolutions in a rotary crusher by 20 %, since the result of crushing in a rotary crusher is closest to the optimal one. We also propose an adjusted crushing criterion, which takes into account that the optimal content of the (-0.5) mm fraction.


Keywords: coal charge, crusher, coke, granulometric size, crushing criterion

Вплив типу дробарки на якість вугільної сировини

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

Наталія Датц

Асистент, Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна

e-mail: n.o.dats@i.ua

 ORCID iD: 0000-0003-1963-7020

Анотація: Від рівня подрібнення вугільної шихти залежать суттєво її придатність до коксування. При цьому якість шихти погіршують як крупні куски так і дрібні. Найбільш цінними із цього погляду є класи крупністю 3-0,5мм. Шихту, що складається із зерен вугілля різної крупності та стадії метаморфізму, слід ретельно змішувати за обсягом завантаження. При цьому в кожній точці об'єму шихта матиме однакові технологічні властивості. Це зумовить і однакові параметри пластичного шару при його просуванні в добре усередненому завантаженні і однакові властивості коксу. Регулювання оптимального гранулометричного складу шихти – найбільш ефективний метод поліпшення якості доменного коксу. Це у теперішній час важливо, у зв'язку зі зменшенням, що спіткає здатність вугільної шихти. Ось чому знижується у шихті частки вугілля марок Ж та К. Лабораторне дослідження дозволило провести аналіз впливу конструкції дробильного обладнання на гранулометричний склад вугільної шихти на дробарках валкової, шоківій, роторній, молоткової та дезінтеграторі. При отриманні шихти оптимального гранулометричного складу раціонально використовувати вибіркове подрібнення тільки крупних класів. Цього можна досягти при використанні роторних дробарок. При цьому дрібні фракції проходять через камеру дроблення транзитом, тобто без взаємодії із робочим органом. Для оптимізації процесу подрібнення пропонується збільшити на 20 % кількість обертів у роторній дробарці, так як результат подрібнення на роторній дробарці найбільш наближений до оптимального. Запропоновано скорегований критерій дроблення, якій враховує, що оптимальний вміст фракції (–0,5) мм у підготовленій шихті повинен коливатися у межах від 29 % до 32 %. Відповідно до цього критерію роторна дробарка зі підвищеними на 20 % обертами дає найкращий результат.

Ключові слова (Keywords): вугільна шихта, дробарка, кокс, гранулометричний склад, критерій дроблення

Вступ (Introduction)

При виборі схеми підготовки вугілля до коксування необхідно прагнути, перш за все, отримати кокс найвищої якості. Сировинна база виробництва високоякісного металургійного коксу шаровим коксуванням у печах періодичної дії обмежена. Тому розробляються і реалізуються різні способи підготовки вугілля і шихт до коксування, а також нові безперервні виробництва металургійного та інших видів коксу. В Україні найпоширенішими є різні технології підготовки вугілля та шихт: подрібнення (дроблення), термічна обробка, ущільнення, використання спікливих добавок, а також їх поєднання. Якість коксу буде тим вищою, чим більш однорідною за складом частинок вугілля буде шихта. Однак вугілля саме по собі не є однорідним продуктом, та його різні складові мають дуже різну міцність. Тому дрібні класи неминуче утворюються як під час видобутку, так і при дробленні.

Кожен тип вугілля володіє унікальними характеристиками, що пояснюється його геологічно метаморфізованою породою, яка становить суміш окремих компонентів. Ці складові надають кожному типу його індивідуальні властивості, які відрізняються у різних типів вугілля, навіть у межах конкретного вугільного пласта. Природа цих складових залежить від джерела вихідного матеріалу, геологічної історії та суміжних компонентів, у яких міститься кристалічні і полімерні речовини. Крім того, він має значну макропористу

структуру, та великий внутрішній об'єм мікропор. Додайте до цього мінеральні складові, які дисперговані у вугіллі в різноманітних формах і розмірах, і можна легко зрозуміти, що вугілля є складним і гетерогенним матеріалом. Щоб охарактеризувати поведінку різних видів вугілля при дробленні, необхідно використовувати випробування, засновані безпосередньо на механічному зменшенні розміру часток (Miroshnichenko, 2013).

Рівень подрібнення вугільної шихти помітно впливає на її технологічні властивості. Найбільш цінними із цього погляду є класи крупністю 3-0,5 мм. Більш крупні зерна мають меншу величину питомої поверхні, що дозволяє їм брати активну участь у поверхневій взаємодії з іншими елементами вугільного засипу на стадіях спікання і коксоутворення. Навпаки, переподрібнення вугільних зерен, призводить до так званого явища «самоопіснення» внаслідок чого утруднюється реалізація так званого потенціалу спікання, що характерно для вугільних шихт (Lyalyuk et al., 2013). Встановлено також, що збільшення вмісту класу 0-0,5 мм в шихті, тобто її переподрібнення, призводить до зниження насипної маси шихти, і як наслідок, до зниження механічних властивостей коксу. Традиційно в практиці підготовки вугільної шихти до коксування використовуються молоткові дробарки. Однак при їх використанні порівняно важко регулювати ступінь подрібнення шихти (Nomura et al., 2011).

Для того, щоб тверде тіло зруйнувалося, воно повинно бути напруженим шляхом застосування сили. Тривимірна картина напруг у твердому тілі представляє силу розтягування, стиснення або зсуву на одиницю площини, що діє в будь-якому напрямку через будь-яку точку твердого тіла. Відповідно до напруги відбувається зміна розмірів твердого тіла, яка називається деформацією. Інтеграл від сили (напруги), помноженої на відстань, на яку перемістилася сила (деформація), є енергією, збереженою в твердому тілі через його напругу та деформацію.

В основному, ідеальне тверде тіло повинно руйнуватися, коли прикладена сила розтягування достатня для одночасного розриву всіх площин атомів або молекул шляхом розтягування когезійних зв'язків між атомними площинами до точки розриву. На практиці багато частин твердого тіла слабші за ідеальну структуру через дефекти твердого тіла. Відомо, що частки різного розміру руйнуються з різною швидкістю. Оскільки руйнування виникає через дефекти твердого тіла, спричинені напругою, дрібні частинки потребуватимуть вищих рівнів напруги для їх руйнування, оскільки існує менша ймовірність виявлення великого дефекту в малому об'ємі. Отже, безперервний процес руйнування усуває слабкі дефекти, залишаючи тверде тіло міцнішим. Щоб розбити одиницю маси малих частинок, необхідно, щоб були охоплені майже усі. Однак, коли маленька частинка напружується до рівня, при якому відбувається руйнування, необхідний високий рівень напруги, ймовірно, призведе до багатьох розгалужених тріщин і більшого вибухового розпаду. Також можливо, що високі напруги, які необхідні для руйнування дуже дрібних частинок вугілля, сприяють пластичній поведінки вугілля, оскільки воно справді має певний ступінь в'язкопружної поведінки, і його можна вважати органічним полімером.

З іншого боку, за певних обставин додавання більшої потужності до дробарки викликає прямо пропорційне збільшення кількості руйнувань за одиницю часу. За цих обставин подвоєння потужності подвоює швидкість руйнування, а енергія на тонну продукту залишається приблизно постійною. Дрібні частинки руйнуються повільніше, ніж великі, тому для більш тонкого помелу потрібно більше енергії. З іншого боку, великі частинки можуть дуже важко руйнуватися в дробарці, тому що сили, необхідні для напруження їх до точки руйнування, можуть ніколи не бути досягнуті. Очевидно, що навіть якщо дана сила, прикладена до маленької частинки діаметром 1 мм, створює локальне напруження розтягу 710 кПа, то та сама сила, прикладена за ідентичних умов до куска діаметром 10 мм, може спричинити локальну напругу розтягування не більше 70 кПа через більшу площу та об'єм (Rejdak et al., 2015).

З аналізу літературних даних (Lyalyuk et al., 2013) слідує, що у доменній плавці необхідний кокс із вмістом класу 0-0,5 мм на рівні 30-32 %. Регулювання гранулометричного складу шихти найбільш дієвий метод поліпшення механічної міцності коксу внаслідок

підвищення насипної маси вугільної шихти. Раціональне подрібнення вугілля з помітним зниженням дрібних класів набуває все більшого значення у зв'язку з тим, що спікаюча здатність шихт для коксування зменшується через зниження в них частки вугілля марок Ж і К.

У цій роботі ставиться завдання дослідження процесу подрібнення вугілля і вибору типу дробарки, що забезпечує оптимальний гранулометричний склад вугільної шихти.

Матеріали та методи (Materials and Methods)

У попередньому розділі було розглянуто, що частинка вугілля, піддана силі стиснення або зсуву, міститиме області напруги розтягування, які ініціюють крихке руйнування через дефекти, активовані напругою. Існує п'ять основних методів, за допомогою яких напруга прикладається до частинок у промислових машинах: пряме стиснення частинки між твердими поверхнями; стиснення відносно легкими ударами кульок; ударне стиснення молотами, що рухаються з високими швидкостями; зсув частинки між поверхнями; ударне стиснення частинок, створене перенесенням частинок у високотурбулентному газовому потоці. Насправді всі машини піддають частинку стисненню та зсуву одночасно, оскільки сила стиснення прикладається під кутом, який автоматично призводить до зсуву. Подібність застосування напруги в усіх машинах може призвести до певної міри подібного розподілу фрагментів, утворених розгалуженим деревом тріщин, і це спостерігалось експериментально.

У нашому дослідженні для подрібнення вугільної шихти використовували лабораторні моделі валкової, цокової, роторної, молоткової дробарок та дезінтегратора.

У цих пристроях для процесу подрібнення матеріалу застосовуються наступні способи його руйнування: роздавлювання, розколювання, злам (розламування), зріз, різання, розпилювання, стирання, удар та їх поєднання. Конструкція дробильного обладнання заснована на переважному використанні одного з основних способів руйнування: роздавлювання, розколювання, удар і стирання, а інші мають, як правило, підрядне значення. Процеси дроблення вугільної шихти здійснюється у вуглепідготовчих цехах коксохімічних підприємств (КХП) та поділяються на дві стадії – попереднє дроблення вугілля та остаточне подрібнення шихти (Popolov et al., 2020).

Застосування попереднього дроблення вугілля дозволяє покращити його транспортування, дозування, усереднення, збагачення та полегшити остаточне подрібнення до потрібного ступеня. У табл. 1 приведені основні характеристики дробарок.

Таблиця 1. Характеристика дробильного обладнання

Стадія підготовки	Тип дробарки	Спосіб дроблення	Принцип дії
попереднє подрібнення	цокова	роздавлювання, розколювання, злам, часткове стирання	Статичний
	валкова	розколювання	
	барабанна	удар, часткове стирання	
остаточне подрібнення	роторна	удар	Динамічний
	молоткова	удар, часткове стирання	
	роторна	удар	
	дезінтегратор	удар	

На коксохімічних підприємствах, що отримують концентрати (збагачене вугілля), попереднє дроблення не проводиться і в схемах технологічного процесу не передбачається.

Це пояснюється тим, що механізований спосіб видобутку вугілля та його переробка на збагачувальних фабриках вугільної промисловості значно знизили крупність кусків у збагаченому вугіллі і тому необхідність у попередньому дробленні відпала. Підготовка вугільної шихти здійснюється в одну стадію із застосуванням тільки остаточного подрібнення

вугілля або шихти (Leikin, 2008).

Для остаточного подрібнення вугілля та шихти на коксохімічних підприємствах застосовуються в основному дробильне обладнання ударної дії, в якому руйнування матеріалу здійснюється ударом робочих органів. Це молоткові, роторні дробарки та дезінтегратори.

Щоківі дробарки – це агрегати, в основі яких лежить принцип роздавлювання матеріалу. Конструкція складається з двох рівних сталевих площин. У різних моделях одна з пластин може бути нерухомою, а інша - коливається. Щоківі дробарки прості за конструкцією, у обслуговуванні, мають невеликі розміри та питому масу (маса, що припадає на одиницю продуктивності). Недоліками щоківих дробарок є невисока продуктивність.

Валкові дробарки – це механізми, основним принципом дії яких є розчалування. Конструкція складається з паралельних валів, що розташовані в горизонтальній площині. Вони обертаються назустріч один одному. Матеріал роздавлюється, проходячи поміж валами. У коксохімічному виробництві для дроблення вугілля найчастіше застосовуються двовалкові зубчасті дробарки, додатковими перевагами яких є: невелика кількість дрібняку та пилу, можливість дробити вологе вугілля.

Роторні дробарки – обладнання для подрібнення м'яких, малоабразивних матеріалів, а також спеціальних міцних матеріалів. Це механізми ударної дії. Основним вузлом є потужний ротор. На нього міцно кріпляться сталеві змінні молотки. Матеріал для подрібнення завантажують зверху. Дроблення здійснюється за рахунок обертання ротора. Роторні дробарки відрізняються простотою конструкції, швидкодією і високою продуктивністю (Yancey et al., 2013).

Молоткові дробарки за призначенням та конструктивним виконанням схожі з роторними. На відміну від них молотки на роторі кріпляться шарнірно. Подрібнення матеріалу здійснюється ударними молотками, що обертаються з великою швидкістю. Конструктивне рішення механізмів дозволяє проводити регулювання ширини отвору для завантаження. Це дає змогу налаштувати обладнання на певну фракцію дроблення (Kim et al., 2020).

У дезінтеграторі матеріал через завантажувальний жолоб надходить у центральну частину на обертову корзину. Пересуваючись, відцентровими силами від центру до периферії кошиків він подрібнюється, піддаючись багаторазовим ударам стрижнів, що обертаються в протилежні сторони. Одночасно спостерігається зіткнення частинок матеріалу (самоподрібнення), а також перемішування. Подрібнений матеріал вивантажується через розвантажувальне вікно, розташоване внизу кожуха (Zaselskiy et al., 2013).

У зв'язку з тим, що схема підготовки вугілля істотно впливає на вихід і якість кінцевого продукту коксохімічного виробництва (доменного коксу), питанням її вдосконалення необхідно приділяти підвищену увагу. Досить відзначити, що потужність електродвигунів дробильних пристроїв становить 60-70% всієї встановленої потужності електродвигунів вуглепідготовчого цеху. Витрата електроенергії на подрібнення 1 т вугілля коливається від 1,0 до 3,5 кВт в залежності від характеристики вугілля, а також від ступеня та способу його подрібнення при підготовці.

У останні роки вміст класу 0-3 мм у вугільній шихті зменшився з 92-94 % до 70-75 %. Крім того збільшилася частка вугілля, яке володіє низькою спіклівістю, тому тільки якісне подрібнення дозволяє зберігати якість коксу на належному рівні.

На основі досліджень встановлений оптимальний гранулометричний склад вугільної шихти. Вміст класу 0-3 мм повинен становити від 80 до 88 % (Lyalyuk et al., 2010). Вибір оптимального методу подрібнення забезпечує отримання коксу потрібної якості. Кокс оптимальної якості може бути отриманий якщо вугілля марок Ж та К буде після подрібнення містити класу 0-3 мм до 75 %, а вугілля марок Г та ПС – до 81 %. В той же час збільшення вмісту класу 0-0,5 мм буде зменшувати насипну щільність шихти, погіршувати її коксівність, що призведе до погіршення фізико-механічних властивостей коксу (Kelly et al., 1989).

На більшості коксохімічних підприємствах підготовка вугільної шихти відбувається за схемою ДШ. При цьому спостерігається значне переподрібнення добре спіклого вугілля та збільшується кількість опіснюючих компонентів класу 0-0,5 мм. Якщо вміст цього класу

збільшується до 51-53 %, то відбувається різке зниження насипної щільності шихти, збільшується винос пилу, знижується якість смоли за зольністю, збільшується кількість фусів.

При зміні рівня подрібнення шихти (вміст класу < 3 мм) від 66% до 80% насипна щільність знижується на 4,7%, а від 80% до 90% – ще на 7,2%. При зміні насипної маси від 700 до 900 кг/м³ витрата тепла зростає на 0,6 % при подальшому зростанні насипної густини від 900 до 1000 кг/м³ (наприклад, при використанні методів брикетування та трамбування шихти) витрата тепла збільшується ще на 3,3 %. При цьому при зміні рівня подрібнення шихти за вмістом класу < 3 мм від 70 до 80%, при постійній щільності насипної маси шихти (за рахунок застосування способів попереднього ущільнення шихти перед коксуванням) витрата тепла трохи знижується - на 1,4%. У виробничій шихті зміст класу 0-0,05 має бути понад 30-32 %.

При надмірному вмісті класу (-0,5мм) підвищується питома площа поверхні інертних частинок, що призводить до зайвої адсорбції активних частинок і зниження кількості колоїдної речовини, збільшення в'язкості, зниження плинності і спричиняє зниження тиску розширення, що погано позначається на силі зчеплення всередині матеріалу. Таким чином, переподрібнення матеріалу може знизити його питому вагу, що спричиняє зниження міцності коксу, а також зниження продуктивності при його виробництві (Zaselskiy et al., 2021).

Вугілля, що переподрібнене, насамперед, впливає на міцність коксу. Що стосується добре спікливого вугілля (коксівне і жирне), то воно повинні бути подрібнене досить великими шматками. Його переподрібнення тягне за собою зниження насипної щільності, збільшення простору між частинками. При піролізі частинок маленької крупності продукти газової фази, що утворюються всередині частинок, легко випаровуються. У процесі піролізу вільному водню не вистачає часу для утворення вільних радикалів, що знижує коефіцієнт утворення продуктів рідинної фази і як наслідок знижує адгезію всередині матеріалу.

Отже, необхідний підбір оптимального ступеня подрібнення шихти з використанням, наприклад, попереднього відсіву дрібних класів, що можливо реалізувати практично на всіх підприємствах. Рівень подрібнення газового вугілля після попереднього дроблення має становити 68-70 %, кінцевий рівень подрібнення шихти після остаточного дроблення – 75-77 %, у тому числі вміст пилоподібних класів (менше 0,5 мм) у підготовленій шихті не повинен перевищувати 30 %. Якщо рівень подрібнення шихти перед коксуванням не є оптимальним (внаслідок нераціональних технологічних параметрів роботи вуглепідготовчого цеху) або в окремих камерах (внаслідок збоїв у роботі вуглепідготовки або сегрегації шихти у вугільній вежі), зростання насипної щільності шихти за рахунок її недостатнього помелу призводить до необхідності збільшення рівня температур у контрольних вертикалах приблизно на 3°C на кожні 0,01 т/м³ (10 кг/м³) збільшення насипної щільності шихти та збільшення витрати тепла на коксування. Це зумовлено погіршенням умов прогріву великих вугільних зерен (Lyalyuk et al., 2013).

Результати (Results)

Шихту для дослідження відбирали з конвеєра цеху вуглепідготовки КХВ «АМКР». Пробу вугілля квартували. Маса проби визначалася за формулою:

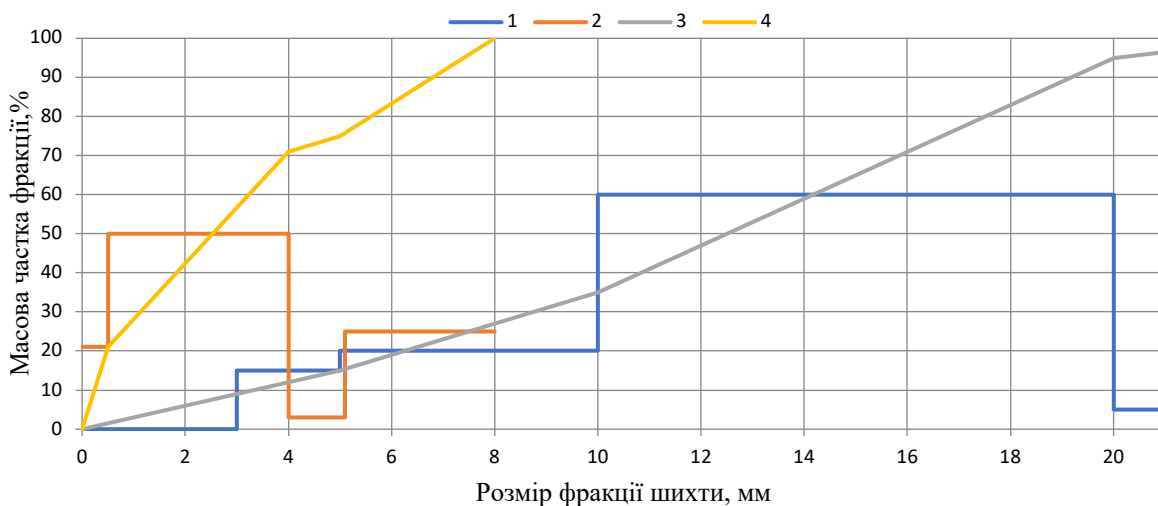
$$M = K \cdot d^2, (1)$$

де М – маса проби, кг; К – коефіцієнт пропорційності, К = 0,1; d – максимальний діаметр частинок вугілля, мм.

Шихта мала наступний склад, %: Ж – 30,3; Г17 – 10,2; КЖ14 – 12,8; К – 32,1; К2 – 12,6; Г6 – 2,1. Початкова маса проби становила 64 кг. Далі її ділили на 8 частин, потім кожну частину ще 4 частини. Таким чином формувалася проба вугілля для дослідження масою 2 кг. Ця проба містила класу, %: 20-50 мм – 5, 10-20 мм – 60, 5-10 мм – 20, 3-5 мм – 15. Фракцію класу 0-3 мм видаляли. Гранулометричний склад подрібненої шихти визначали шляхом

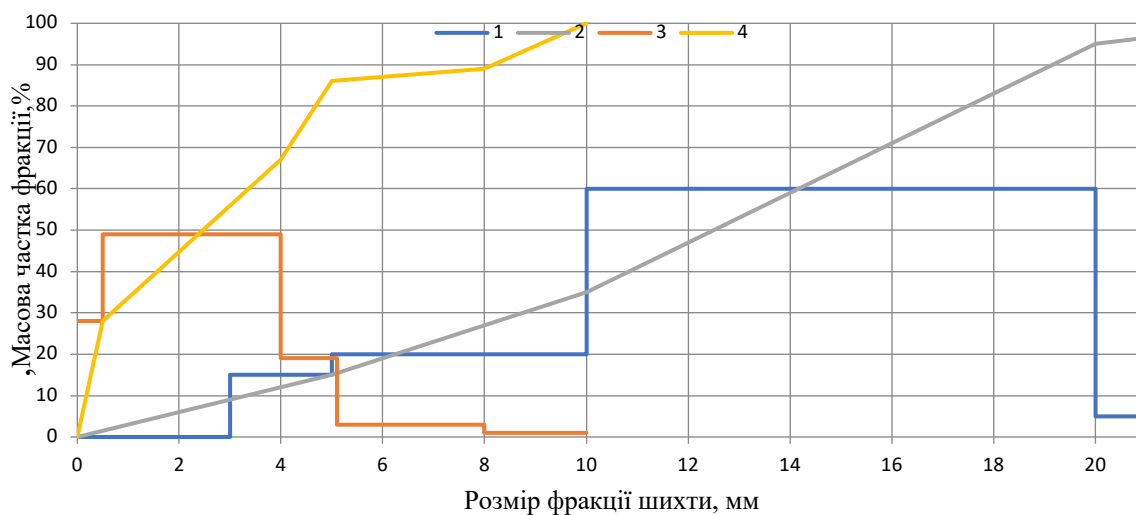
розсівання проби на наборі сит із круглими отворами. Для розсіву було обрано сита з отворами діаметром 0,4; 4; 5; 8 мм. Далі окремі класи зважували і визначали їх вміст у відсотках по відношенню до загальної маси проби.

За знайденими значеннями були побудовані графічні залежності розподілу крупності подрібненої шихти та порівняння з вихідною у диференціальному та інтегральному вигляді. На рис.1,2 у якості прикладу приведені криві для шокової та роторної дробарок.



1 – диференціальна крива для вихідної шихти; 2 – диференціальна крива для подрібненої шихти; 3 – інтегральна крива для вихідної шихти; 4 – інтегральна крива для подрібненої шихти

Рисунок 1. Диференціальні та інтегральні криві розподілу крупності вихідної та подрібненої шихти для шокової дробарки.



1 – диференціальна крива для вихідної шихти; 2 – диференціальна крива для подрібненої шихти; 3 – інтегральна крива для вихідної шихти; 4 – інтегральна крива для подрібненої шихти

Рисунок 2. Диференціальні та інтегральні криві розподілу крупності вихідної та подрібненої шихти для роторної дробарки.

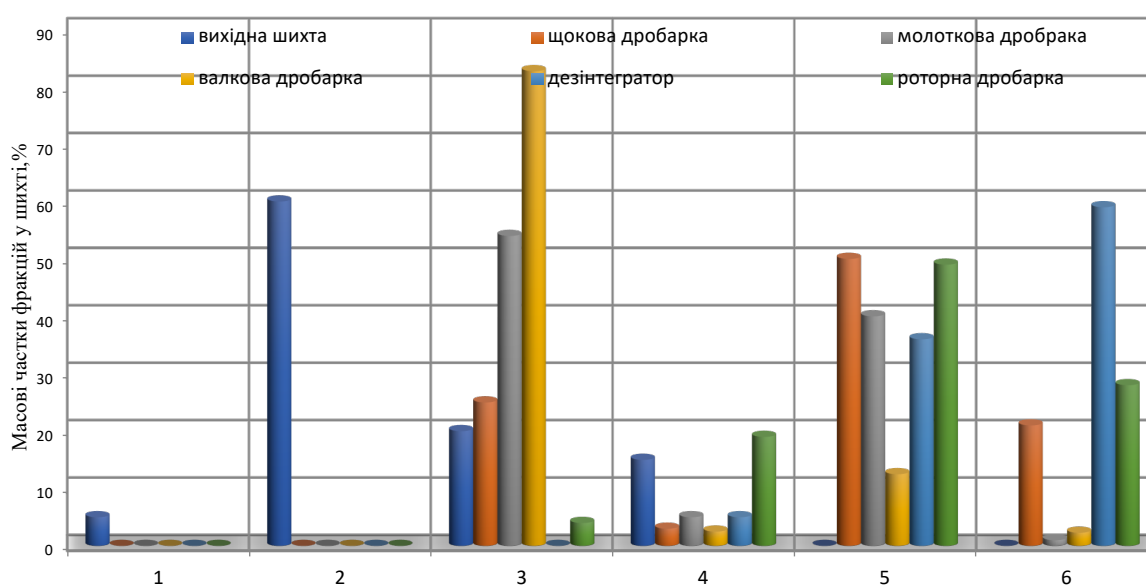
Оброблені дані усіх графіків представлені у таблиці 2 та на рис. 3.

Як ми бачимо з табл. 2 жодна з дробарок не дає оптимальний результат. При дробленні у шоковій дробарки утворюється багато класу – 0,5 мм, у валковій дробарці утворюється навпаки багато класу + 8 мм. У дезінтеграторі також багато дрібного класу. З нашої точки зору

найкращий результат отриманий у роторній дробарці. Для покращення результату пропонується збільшити на 20 % оберти у роторній дробарці. З метою підвищення ефективності процесів подрібнення ведеться пошук нових та удосконалення відомих методів та засобів їх інтенсифікації.

Таблиця 2. Експериментальні результати дроблення вугільної шихти

Вид дробарки	Час дроблення, хв.	Продуктивність, кг/год	Масова частка фракцій у шихті, %				
			- 0,5	0,5-4	4-5	5-8	+8
Щокова	1,24	93,7	21,2	49,8	3,1	25,7	0
Молоткова	2,26	53,3	1,1	39,8	5,2	53,8	0
Валкова	6,2	19,9	2,35	12,3	2,6	23,7	57,4
Дезінтегратор	0,65	200,0	58,9	35,7	5,1	0	0
Роторна	1,09	121,0	27,9	48,6	18,9	2,8	0,9



1 – 20-50 мм; 2 – 10-20 мм; 3 – 5-10 мм; 4 – 3-5 мм; 5 – 0,4-4 мм; 6 – 0,4 мм.

Рисунок 3. Гістограма розподілу крупності вихідної та подрібненої шихти, залежно від використовуваної дробарки

На підставі даних графіків та таблиці 2 було визначено вміст фракцій 0-3 мм, - 0,5 мм і +6 мм і відхилення цих значень від оптимальних (Δ) за формулою (2):

$$\Delta = \omega_{\text{у шихті}} - \omega_{\text{опт}}, \quad (2)$$

де Δ – відхилення, %; $\omega_{\text{у шихті}}$, – масова частка окремої фракції у шихті, %; $\omega_{\text{опт}}$ – оптимальне значення вмісту фракції у шихті, %.

Результати розрахунків приведені у таблиці 3. Дані, наведені в таблиці 3, дозволяють зробити попередні висновки про можливість використання дробарок різних типів для підготовки вугільної шихти. У практиці підготовки вугільної шихти до коксування можна використовували низку критеріїв оцінки якості дроблення. З нашої точки зору найбільш простим та інформативним буде критерій дроблення, якій може бути розрахований за формулою (3):

$$C_{др} = \frac{\omega_{+6} + \omega_{-0,5}}{\omega_{0-3}}, \quad (3)$$

де $C_{др}$ – критерій дроблення; ω_{+6} – масова частка класу +6 мм, %; $\omega_{-0,5}$ – масова частка класу – 0,5 мм, %; ω_{0-3} – масова частка класу 0-3 мм, %.

Цей критерій враховує, що наявність у готовій шихті фракції (+6) мм і фракції (0-0,5) мм є безумовно негативним фактором. Пам'ятаємо, що мета дроблення – збільшення вмісту в готовій шихті фракції (0-3) мм. З іншого боку комплексна оцінка впливу фракції (0-0,5) мм показала, що оптимальний вміст фракції (–0,5) мм у підготовленій шихті повинна бути ні 0, а коливається у межах від 29 % до 32 %. Тому нами пропонується записати критерій якості дроблення у скоригованому вигляді:

$$C_{др}^* = \frac{\omega_{+6} + (\omega_{-0,5} - 32)}{\omega_{0-3}}, \quad (4)$$

Дані по якості дроблення та розрахунок критеріїв дроблення приведені у табл. 3.

Таблиця 3. Порівняння результатів дроблення вугільної шихти з оптимальним вмістом фракцій

Оптимальний вміст	Масова частка фракції, %						$C_{др}$	$C_{др}^*$
	0-3 мм	Δ_{0-3}	-0,5 мм	$\Delta_{-0,5}$	+6 мм	Δ_{+6}		
	80–88	–	~30	–	0	–		
Вихідна шихта	8,2	-71	2,1	-28,2	82	+82	10,4	12,4
Дробарки								
Щокова	56,1	-25	20,9	-9,2	17,9	+18,2	0,697	0,160
Молоткова	29,9	-51	2,9	-27,1	35,7	+36,3	1,28	0,300
Валкова	12,5	-67,1	2,4	-27,4	55,2	+55,1	4,57	6,874
Роторна	54,8	-24,5	28,1	-2,1	12,7	+13,2	0,744	0,271
Дезінтегратор	84,1	+4,1	58,8	+29,8	0	0	0,71	0,344
Роторна (проектна)	86,2	0	32,2	0	2,2	+1,9	0,394	0,019

Аналіз цих даних показує, що якість дроблення в дробарках різного типу різні і може бути з використанням наступного ряду:

Проектна роторна підвищеними на 20 % оборотами (0,019) – щокова (0,160) – роторна (0,271) – молоткова (0,300) – дезінтегратор (0,344) – валкова (6,874).

Висновки (Conclusions)

У разі переподрібнення вугільної шихти, тобто збільшення в ній класу (0-0,5) мм вище за оптимальні значення, спостерігається ефект "самоопіснення", тобто зниження вмісту в шихті вітриніту. Таким чином регулювання гранулометричного складу шихти, а саме, зниження вмісту класу 0-0,5 мм до оптимального значення 29-32 % - найбільш дієвий метод поліпшення механічної міцності коксу, внаслідок збільшення насипної маси вугільного завантаження. Традиційний погляд на те, що чим більший розмір має частинка вугілля, тим більші зусилля необхідні для його руйнування є неабсолютним. Це пов'язано з тим, що вугільна шихта надходить на КХП стабілізована за міцністю за рахунок попереднього руйнування в процесі збагачення. У молоткових дробарках реалізуються два способи дроблення: удар і стирання. Наростання дріб'язка відбувається в основному за рахунок стирання. Для зменшення переподрібнення шихти необхідно виключити або знизити вплив сил стирання під час дроблення. Для отримання шихти оптимального гранулометричного

складу раціонально використовувати вибіркоче подрібнення тільки крупної її частини. Цього можна досягти при використанні роторних дробарок, у яких дрібні фракції проходять через камеру дроблення транзитом, тобто без взаємодії з робочим органом. Отже, заміна молоткових дробарок на роторні у вуглепідготовчому цеху КХП дасть змогу знизити вміст класу - 0,5 мм до оптимального.

Конфлікт інтересів (Conflicts of interest)

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Фінансування (Funding)

Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування.

Внесок авторів (Authors contribution)

Концептуалізація, М. К.; методика, К. Ш.; формальний аналіз, Н. Д.; аналітичні дані, М.К.; візуалізація, К. Ш.; нагляд, М. К.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література (References)

- Kelly, E.G. & Dawe, G.A. (1989). Modified Bond method for the evaluation of crusher efficiency. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 6, 14–17. <https://doi.org/10.1007/BF03402519>
- Kim, D., Choi, G. & Oh, H.-S. (2020). Ensemble patch transformation: a flexible framework for decomposition and filtering of signal. *J. Adv. Signal Process*, 1, 1–27. <https://doi.org/10.1186/s13634-020-00690-7>
- Leikin, V.Z. (2008). Development of Equipment and Perfection of Technology to Prepare Fuel for the Firing and Gasification in Circulating and Stationary Fluidized Beds. *Therm. Eng*, 55, 83–93. <https://doi.org/10.1134/S0040601508010175>
- Lyalyuk, V. P., Sheremet, V. A., Kekukh, A. V., Otorvin, P. I, Pissar, S. A., Uchitel A. D., Lyahova, I. A. & Kassim D. A. (2010). Rational Crushing of Coal Charge for Improvement of Coke Quality for Blast-Furnace Smelting. *Metallurgical and Mining Industry*, 2(2), 81-86. <https://metaljournal.com.ua/assets/Uploads/attachments/Lyalyuk-81.pdf>
- Lyalyuk, V. P., Sokolova V.P., Lyahova, I. A., Kassim D. A. & Shmeltser E.O. (2013). O racionalnoj stepeni drobleniya ugolnyh shiht dlya koksovaniya s vysokim soderzhaniem zhirnyh uglej. *Girnichij visnik*, 96, 170-173. <http://ds.knu.edu.ua/jspui/handle/123456789/1584>
- Meshram, A., Dash, P.S., Nag, D. & Singh R. (2022). Enhancement of coking potential of coals with improvised crushing mechanism. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 42(11), 3399-3414. <https://doi.org/10.1080/19392699.2021.1963710>
- Miroshnichenko, D. V. (2013). Crushing Properties of Coal. *Coke and Chemistry*, 56(12), 449–455. <https://doi.org/10.3103/S1068364X13120090>
- Nomura, S., Arima, T., Dobashi, A. & Doi K. (2011). Coking Pressure Control by Selective Crushing of Yigh Coking Pressure Coal. *ISIJ International*, 51(9), 1425-1431. https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational/51/9/51_9_1425/_pdf
- Popolov, D., Zaitsev, G., Zaselskiy, I., Velitchenko, V. & Konovalenko, V. (2020). Experimental Studies of the Process of Crushing Coal Charge on Hammer Mill with the View of Introducing Technologies and Products 4.0 at the Industrial Enterprises. III International Scientific Congress Society of Ambient Intelligence (ISC-SAI 2020). *Advances in Economics. Business and Management Research*, 129, 110-115. <https://www.atlantis-press.com/proceedings/isc-sai-20/125937204>
- Rejda, M. & Wasielewski R. (2015). Mechanical compaction of coking coals for carbonization in

- stamp-charging coke oven batteries. *Physicochem. Probl. Miner. Process*, 51(1), 151–161. <http://dx.doi.org/10.5277/ppmp150114>
- Yancey, N., Wright, C. & Westover, T. (2013). Optimizing hammer mill performance through screen selection and hammer design. *Biofuels*, 4(1), 85-94. <https://doi.org/10.4155/bfs.12.77>
- Zaselskiy, V., Popolov, D., Zaytsev, H. & Shepelenko, M. (2021). Upgrade of Conveyor Line for CoalCharge Preparation with the Use of Modern Grading-and-Mixing Equipment. *Sci. innov.* 17(3), 67-77. <https://doi.org/10.15407/scine17.03.067>
- Zaselskiy, V., Zaitsev, G. & Zaselskaya, T. (2012). Influence of the granulometric composition of coal batch on the energy requirements of a hammer mill. *Coke and Chemistry*, 55(7), 282-285. <https://doi.org/10.3103/S1068364X12070101>