

**МЕХАНІЧНА МІЦНІСТЬ ВУГІЛЛЯ: МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ТА ФАКТОРИ ВПЛИВУ (ОГЛЯД)**© В.В. Коваль<sup>1</sup>, Д.В. Мірошніченко<sup>2</sup>*Державне підприємство «Український державний науково-дослідний вуглехімічний інститут (УХІН)», 61023 м. Харків, вул. Весніна, 7, Україна*О.В. Богоявленська<sup>3</sup>*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна*<sup>1</sup> Коваль Валентин Валерійович, провідний інженер вугільного відділу (ВВ), e-mail: [kovalen79@gmail.com](mailto:kovalen79@gmail.com)<sup>2</sup> Мірошніченко Денис Вікторович, докт. техн. наук, проф., головний наук. співр. ВВ, e-mail: [dvmir79@gmail.com](mailto:dvmir79@gmail.com)<sup>3</sup> Богоявленська Олена Володимирівна, канд. техн. наук, доц. кафедри технологій переробки нафти, газу та твердого палива, e-mail: [evbsob@gmail.com](mailto:evbsob@gmail.com)

У статті обґрунтовано важливість та проблеми визначення такого показника якості твердих горючих копалин (ТГК), як механічна міцність. Показано, що міцність вугілля залежить від великої кількості факторів (в'язкість, крихкість, тріщинуватість, властивості структурних зв'язків, тощо), врахувати зміну котрих неможливо. Тому міцність вугілля в пробі, шматку, пачці та пласті необхідно представляти деяким інтегральним показником, чисельне вираження котрого неминуче коливається біля певного середнього значення та може бути визначене лише приблизно. Показано, що оцінка властивостей міцності вугілля повинна здійснюватися на основі масових випробувань із застосуванням статистичних методів, що дозволяють обчислити середнє значення і коефіцієнт варіації. Оскільки розкид міцності обумовлений в основному природною неоднорідністю вугілля, то підвищення точності вимірювальних приладів практично не впливає на статистичні характеристики. Лабораторні методи механічних випробувань породних зразків, порівняно з натурними, з огляду на свою розробленість, здебільшого є доступними і високонадійними (за умови якісного виконання випробувань).

Відзначено, що властивості вугілля як об'єкту збагачування та використання в значній мірі пов'язані з його фізичними властивостями. Фізичні властивості вугілля і мінеральних домішок істотно впливають на формування основних параметрів, які характеризують гранулометричний і фракційний склади, зміни останніх в процесах видобутку, транспортування і вуглезбагачення.

У статті висвітлено основні фізико-механічні властивості ТГК з точки зору їх промислової переробки, наведено огляд основних методів визначення їх механічної міцності та обладнання, що при цьому використовується. Зазначено головні переваги та недоліки цих методів, а також їх взаємозв'язок. Вказано фактори, що впливають на механічну міцність вугілля. Оцінено доцільність використання існуючих методів з точки зору інформативності показників міцності матеріалу щодо сфери його застосування. Детальніше розглянуто методи, що є поширеними у вуглепереробній галузі.

**Ключові слова:** вугілля, тверді горючі копалини (ТГК), механічна міцність, методи визначення, фактори впливу, коефіцієнт розмоздатності, індекс подрібнюваності.

Автор для листування В.В. Коваль, e-mail: [kovalen79@gmail.com](mailto:kovalen79@gmail.com)

\*\*\*\*\*

**1. ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ**

Фізико-механічні властивості ТГК визначають не лише умови їх видобутку (опір різанню, допустимі розміри вугільних ціликів, що залишаються в шахтах, стійкість бортів кар'єрів), а й умови подальшої переробки та використання. Від міцності ТГК певною мірою залежить гранулометричний склад видобутого палива, вміст у ньому дріб'язку, вихід сортового палива, а також витрати на пилоприготування для вироблення електричної та тепло-

вої енергії. Від механічних властивостей та гранулометричного складу ТГК залежить організація процесу їх збагачення, підготовки вугілля до коксування, вихід відповідних класів для напівкоксування та інших видів переробки [1-11].

З механічною міцністю, крихкістю, дроблюваністю вугілля та супутніх порід пов'язані гранулометричний склад, шламоутворення та абразивний вплив на робочі поверхні. Механічна міцність вугілля та засмічуючих порід оцінюється дроблюваністю, твердістю, крихкістю, тимчасовим опором стиску та термічною стійкістю, що відображає опір зовнішнім зусиллям при високих температурах. Виконані дослідження показали, що зі збільшенням ступеню метаморфізму, зі зниженням виходу летких, твердість речовини вугілля зростає, а тріщинуватість спочатку зростає, а потім падає. Через це малометаморфізоване вугілля є середнім за міцніс-

тю, але в'язким; вугілля середнього ступеню метаморфізації (завдяки розвиненій тріщинуватості) – найслабкішими, а сильно метаморфізовані антрацити – найбільш твердими та міцними [2-5].

На вибір методу вимірювання твердості впливають різні фактори: обсяги вимірювань, твердість вимірюваних зразків, їх геометрія, лінійні розміри та ін. Це спричинило появу різних методів вимірювання твердості. Практично всі вони регламентовані ГОСТами та ISO [12-16].

Твердість умовно поділена на макротвердість (навантаження понад 49 Н), твердість та мікротвердість (навантаження від 0,049 Н до 4,9 Н). Твердість вугілля зазвичай визначають за допомогою пристроїв Роквела, Брінеля або Вікерса (алмазна пірамідка), котрими вимірюють опір зразка роздавлюванню при статичних навантаженнях (рис. 1).

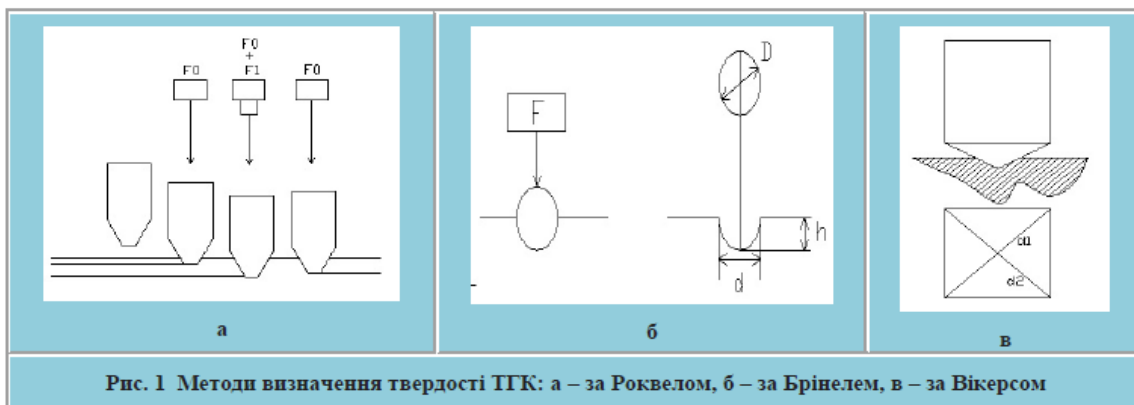


Рис. 1 Методи визначення твердості ТГК: а – за Роквелом, б – за Брінелем, в – за Вікерсом

Твердість також може бути знайдена за методом Шора (склероскопічний аналіз), при якому втрата кінетичної енергії падаючого металевго предмета, що поглинається при зіткненні з випробуваним зразком, визначається за висотою відскоку.

## 2. МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНОЇ МІЦНОСТІ

### 2.1. Вплив різних факторів на механічну міцність ТГК

Як вже було сказано вище, численними дослідженнями встановлено, що механічна міцність вугілля значно змінюється в залежності від ступеня їх вуглефікації та петрографічного складу. Результати визначення механічної стійкості вугілля Кузнецького басейну різної стадії метаморфізму наведено на рис. 2 [4]. Механічна стійкість у цьому випадку визначалася на ситі з осередками розміром 2,5 мм після 500 обертів барабана.

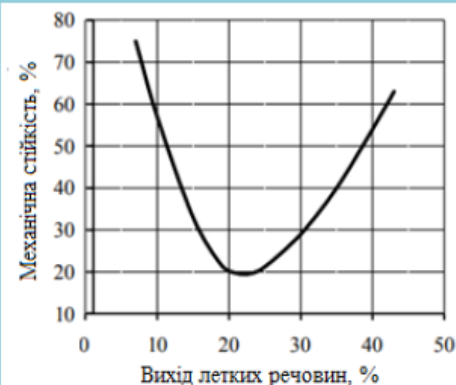


Рис. 2 Опір дробленню вугілля залежно від його стадій метаморфізму

Як впливає з отриманих результатів, опір дробленню вугілля залежно від виходу летких речовин змінюється за кривою з мінімумом в області вугілля марок Ж і К. Характер цієї кривої визначається зміною хімічної структури вугілля.

Природа підвищеної міцності вугілля крайніх стадій вуглефікації є різною. Збільшення міцності сильно метаморфизованого вугілля пояснюється зростанням вуглецевих сіток з орієнтацією паралельних вуглецевих сіток в пакети зі збільшенням міцних між'ядерних зв'язків, створених вуглецевими валентностями. Мало-метаморфизоване вугілля з високим вмістом кисню має велику внутрішню поверхню і високу механічну міцність. Отже, зв'язок між макромолекулами у цьому вугіллі жорсткий. Проте жорсткість структури у цьому випадку обумовлена не вуглецевими валентностями, а кисневими зв'язками. Зменшення міцності при переході до вугілля середнього ступеня вуглефікації, мабуть, пов'язане зі зменшенням довжини бічних ланцюгів макромолекул, а також з видаленням кисню у вигляді двоокису вуглецю та води. Все це послаблює структуру внаслідок зменшення хімічного зв'язку через кисневі містки та зменшення ролі водневих зв'язків. Подрібнення літотипів вугілля не є однаковим. Найменша механічна міцність властива фюзену. Дещо вища міцність вітрена і кларена. Найбільш важко подрібнюваний споровий дюрел, у якому формени елементи відіграють роль армуючих компонентів в органічній масі вугілля [17].

## 2.2. Міцність матеріалу за Моосом

Ряд авторів [18-22] трактують поняття твердості як опір, що надається тілом проникненню до нього іншого тіла, тобто, асоціюють цей показник із місцевою міцністю на вдавлювання. Широке поширення такі методи отримали після того, коли в 1822 р. німецьким мінералогом Фрідріхом Моосом була запропонована шкала твердості. Згідно з нею твердість матеріалу визначається по тому, котрий з 10 стандартних матеріалів дряпає матеріал, що тестується, і який матеріал з 10 стандартних матеріалів дряпається тестованим матеріалом. Міцність матеріалу за Моосом залежить від рівня зв'язності внутрішньоатомної структури матеріалу. Шкала Мооса представлена у табл. 1 [23].

Визначення міцності інших матеріалів, не охоплених цією шкалою, здійснюється за допомогою набору матеріалів-еталонів шляхом надавлювання ними на поверхню досліджуваного матеріалу. Якщо матеріал-еталон залишає подряпину на поверхні досліджуваної речовини, її відносна міцність нижча, ніж аналогічний показник матеріалу-еталона.

У більшості випадків значення коефіцієнта міцності матеріалу, який подрібнюється в шарових млинах, знаходиться в інтервалі від 6 до 9 за шкалою Моосу. Твердість кам'яного вугілля за шкалою Мооса становить 2-5.

Цей метод застосовується на практиці у багатьох лабораторіях. Але разом з тим, на складність як методики, так і самого процесу дряпання вказував Л.А. Шрейнер. Він стверджував, що дряпання є складнішим процесом руйнації, ніж вдавлювання, причому питому роботу руйнації неможливо обчислити, адже неможливо точно виміряти об'єм подряпини [18]. А.А. Агроскін [20] також зазначав, що процес дряпання сам собою представляє складну функцію пружних, пластичних і абразивних властивостей. Застосування методів вдавлювання або склерометричних методів до матеріалу, структура якого неоднорідна і характеризується безліччю властивостей, або неможливе, або дуже проблематичне [24]. Враховуючи яскраво виражену неоднорідність складу та характеристик поверхні ТГК, важливо застосовувати такий спосіб оцінки їх механічних властивостей, який дозволив би максимально диференціювати та відчувати мінімальні, отже однорідні за властивостями ділянки зразків ТГК.

Таблиця 1

Шкала твердості за Моосом

Мінерал-еталон	Твердість
Тальк	1
Гіпс	2
Кальцит	3
Флюорит	4
Апатит	5
Ортоклаз	6
Кварц	7
Топаз	8
Корунд	9
Алмаз	10

2.3. Таким способом є метод визначення мікротвердості та мікрокрихкості, регламентований ГОСТ 21206-75 [14]. Цей стандарт поширюється на кам'яне вугілля та антрацит і встановлює методи визначення мікротвердості та мікрокрихкості вітриніту кам'яного вугілля та антрациту в аншліф-брикетах та аншліф-штуфах. Сутність методу полягає у вимірі діагоналі квадратного відбитка, що залишився на поверхні випробуваного зразка після вдавлювання алмазного наконечника правильної чотиригранної піраміди під постійним навантаженням, що накладається протягом певного часу. [25, 26]. Метод визначення мікротвердості та мікрокрихкості вугілля та антрациту призначений для порівняльної оцінки його фізико-механічних властивостей (механічної міцності, розмолотості, подрібнюваності, тощо) за малої кількості середньопластової



проби. Приладом для вимірювання мікротвердості є мікротвердомір ПМТ-3 (рис. 3).

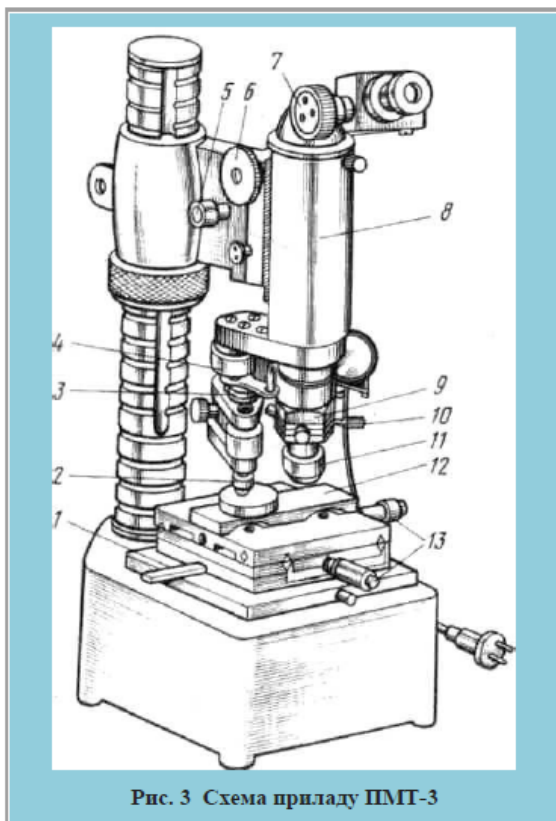


Рис. 3 Схема приладу ПМТ-3

Прилад складається зі штатива 8 вертикального мікроскопа з тубусом, що переміщається вгору і вниз за допомогою гвинта 6 і мікрометричного гвинта 5. На верхній кінець тубуса насаджений окулярний мікрометр 7, а в нижньому кінці закріплені штوك 2 з алмазною пірамідою, опакілюмінатор 9 та об'єктиви 11 для перегляду мікрошліфа при збільшеннях 135 і 478 крат. В опакілюмінаторі є лампочка напругою 6 В, що живиться від електромережі через трансформатор. За допомогою мікрометричних гвинтів 13 столик мікроскопу переміщують у необхідному напрямку. Ручка 1 служить задля повороту столика на 90°. Прилад забезпечений двома об'єктивами. Окуляр збільшує у 15 разів. Окулярний мікрометр має нерухому сітку, відліковий мікрометричний барабанчик та каретку з рухомою сіткою. На нерухомій сітці довжиною 5 мм нанесені штрихи з цифрами та косинець з прямим кутом, вершина якого збігається з цифрою 0. На рухомій сітці нанесено косинець з прямим кутом та дві риски.

Залежність показників мікротвердості та мікрокрихкості від ступеню метаморфізму вугілля має складний характер. Максимальні значення тріщинуватості та крихкості вугілля припадають на інтервал показника відбиття вітриніту ( $R_o$ ), в якому щільність вугілля має мінімальні значення ( $R_o = 0,85-2,5\%$ ). У цьому інтервалі вугілля характеризується найбільшим електроопіром. Мікротвердість збільшується для вугілля в інтервалі показників  $R_o = 0,5-1,0\%$ , потім зменшується до стадії метаморфізму, що відповідає  $R_o = 1,5\%$ , після чого починає знову зростати [2].

Встановлено, що мікротвердість компонентів групи вітриніту в залежності від вуглефікації та генетичних факторів знаходиться в межах від 200 до 350 МПа; мікротвердість компонентів групи семівітриніту коливається в межах від 250 до 420 МПа; мікротвердість компонентів групи інертиніту коливається від 500 до 2300 МПа та мікротвердість компонентів групи ліпніниту коливається від 80 до 250 МПа [27].

#### 2.4. Визначення механічної міцності випробуваннями у обертовому барабані.

Механічна міцність визначає ступінь опору ТГК дробленню їх різними методами. За ГОСТ 15490-70 «Вугілля буре, кам'яне, антрацит та термоантрацит. Методи визначення механічної міцності» досліджувані матеріал обробляють у обертовому барабані закритого типу і визначають вихід класу розміром більше нижньої межі крупності випробуваної проби [15].

Для випробування великих класів крупності використовується сталевий барабан закритого типу діаметром 1000 мм, довжиною 590 мм та товщиною стінок 5 мм (рис. 4).

На внутрішній поверхні циліндра приварені три смуги зі сталі завтовшки 5 мм, з висотою ребра 250 мм, розташовані на рівних відстанях одна від одної. Частота обертання барабана – 25 об/хв. Після скорочення вихідної проби від неї відбирається три наважки по  $25 \pm 0,5$  кг. Наважку досліджуваного матеріалу завантажують до барабана так, щоб шматки опускалися по його внутрішній поверхні, і щільно закривають кришку люка. Після 100 повних обертів барабан автоматично зупиняється. Пробу вивантажують, ретельно збираючи весь дріб'язок. Після випробувань у барабані проводиться розсівання досліджуваного матеріалу на механічному грохоті або вручну. Показник механічної міцності ( $\Pi$ ) у відсотках обчислюють за формулою:

$$\Pi = \frac{m_1}{m} \cdot 100 \quad (1)$$

де  $m$  – маса наважки, кг;  $m_1$  – маса надгратного продукту після випробування в барабані, кг.

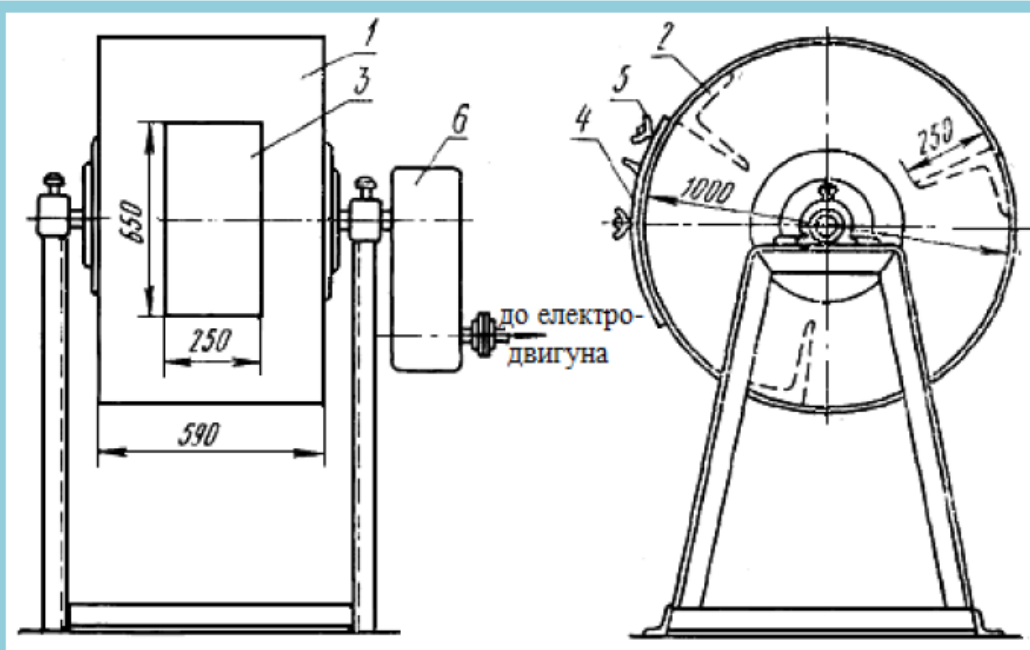


Рис. 4 Великий сталевий барабан закритого типу  
1 – барабан; 2 – сталеві смуги; 3 – завантажувальний люк; 4 – кришка люка;  
5 – кріплення дверцят; 6 – редуктор

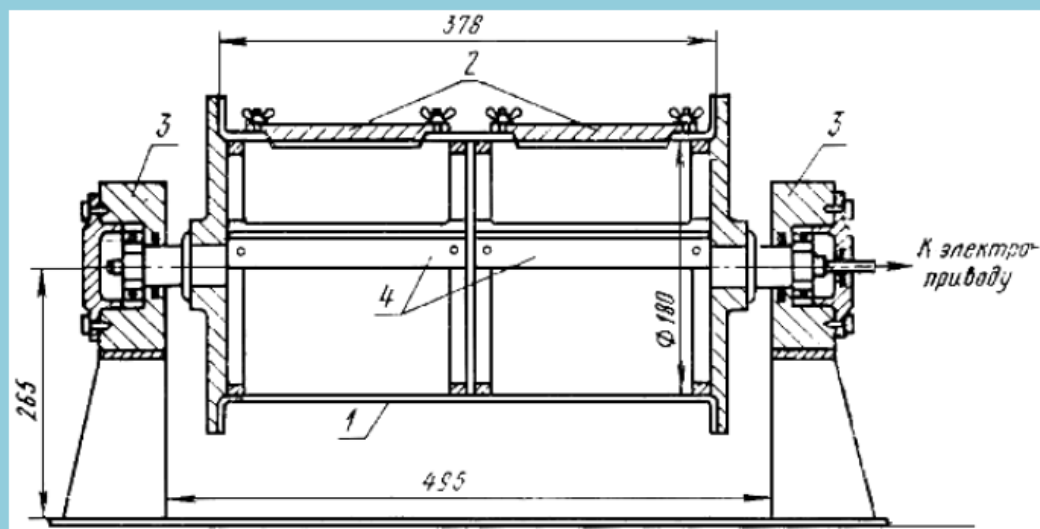


Рис. 5 Малий здвоєний барабан  
1 – здвоєний барабан; 2 – смуги сталеві; 3 – редуктор; 4 – дверцята, що загвинчуються

За остаточний результат випробування приймають середнє арифметичне результатів двох визначень, якщо результат другого визначення відхиляється від першого не більше ніж на 10 % відн. В іншому разі проводять третє визначення і за остаточний результат приймають середнє арифметичне результатів двох найближчих визначень.

Для випробування класу крупності 25-50 мм слугує малий зведений барабан (рис. 5).

Діаметр та довжина кожного циліндра дорівнюють 180 мм. Усередині кожного циліндра є три смуги шириною 30 мм. Частота обертання – 50 об/хв. Вихідну пробу скорочують до залишку масою щонайменше 10 кг. У кожен із циліндрів завантажують по 1 кг випробуваного вугілля. Після 20 хв обертання барабана проби окремо розсіюються на ситі з отворами 25×25 мм. Сито струшують у горизонтальному напрямку у той та інший бік по 5 разів. Вугілля, що залишилося на ситі, ретельно збирають і зважують з точністю до 0,01 кг. Так само випробовують інші дві наважки. Розраховується показник міцності за формулою 1. Остаточним показником механічної міцності є середнє арифметичне результатів чотирьох випробувань.

2.5. Визначення механічної міцності ТГК здійснюється також методом товчення за ГОСТ 21153.1-75 «Породи гірські. Метод визначення коефіцієнта міцності по Протод'яконову» [13]. Сутність методу полягає у визначенні коефіцієнту міцності, що є пропорційним до відношення роботи, витраченої на дроблення гірської породи, до новоутвореної при дробленні поверхні. Остання оцінюється сумарним об'ємом частинок розміром менше 0,5 мм [28].

Для визначення коефіцієнта міцності гірських порід за цим методом застосовують прилад (рис. 6), що складається зі склянки 1, вставленої в неї трубчастого копра 2, всередині якого вільно поміщується гиря 3 масою  $2,4 \pm 0,01$  кг з ручкою 4, прив'язаної до гирі шнуром. Трубчастий копер має у верхній частині отвори, в котрі вставляються штифти 5, що обмежують підйом гирі. У комплекс приладу входить об'ємомірювач, що охоплює склянку 6 і плунжера 7 зі шкалою вимірювань від 0 до 150 мм вздовж його поздовжньої осі.

Для величини, що приблизно характеризує відносну опірність гірської породи руйнуванню, М.М. Протод'яконовим запропонована шкала міцності, за якою гірські породи поділяються на десять категорій з коефіцієнтом міцності  $f$  від 20,0 до 0,3. Вугілля та антрацит в основному відносяться до категорій VI; VI, а; VII з  $f$  від 6 до 1 [29]. Даний метод досить добре відображає міцнісні характеристики для порід різної міцності вугільної формації, порід середньої міцності, але має недоліки щодо коефіцієнта міцності дуже міцних порід.

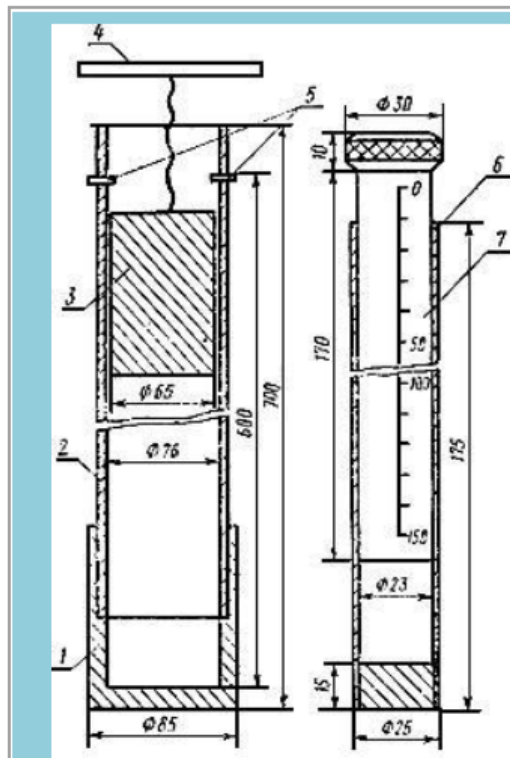


Рис. 6 Схема приладу для визначення міцності вугілля методом товчення

2.6. Принцип визначення механічної міцності вугілля методом ВІМС (Всесоюзний інститут мінеральної сировини) [30] полягає у вимірі ступеню подрібнення дуже малих наважок вугілля металевими кулями в невеликих обертових циліндричних камерах (рис. 7).

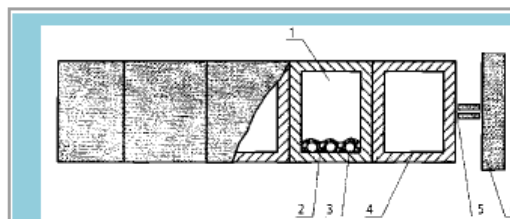


Рис. 7 Диспергометричний прилад для визначення механічної міцності вугілля за методом ВІМС  
1 – камера; 2 – вугілля; 3 – кулі; 4 – стінка камери; 5 – вал; 6 – шків



Апарат складається із шести невеликих металевих камер циліндричної форми з внутрішнім діаметром 82 мм і довжиною 50 мм. Камери з наважкою вугілля і шістьою сталевими кулями ( $d = 19$  мм; маса –  $108 \pm 1$  г) вміщуються в латунний циліндр, закріплений на валу, що обертається на кульопідшипниках. Швидкість обертання камер – 90 об/хв.

Пробу вугілля перед завантаженням дроблять до розмірів зерен 5,1-4,0 мм і відбирають об'єм, що дорівнює  $20 \text{ см}^3$ . Випробовуване вугілля завантажують у камери разом із сталевими кулями (по два паралельні дослідні). Після певної кількості обертів (500 чи 250) прилад зупиняють. Продукти подрібнення розсівають, а отримані класи зважують. Вихід кожного класу обчислюють у відсотках від маси всього подрібненого вугілля. Механічну міцність визначають за виходом класу з крупністю, що перевищує половину початкового розміру зерен. При початковій крупності зерен 5,1-4,0 мм ця величина дає залишок на ситі 2,46 мм. Вміст класу менше 0,074 мм є мірою утворення дрібних класів при дробленні.

## 2.7. Метод визначення коефіцієнта розмолотості – ВПІ

Наразі існує стандартизований метод визначення коефіцієнта розмолотості – ВПІ, розроблений всеросійським теплотехнічним науково-дослідним інститутом (ГОСТ 15489.1-93 «Вугілля буре, кам'яне, антрацит і горючі сланці. Метод визначення коефіцієнта розмолотості за ВПІ») [16]. Принципова схема відповідної установки представлена на рис. 8.



Рис. 8 Установка визначення коефіцієнта розмолотості за ВПІ  
1 – барабан; 2 – мотор-редуктор; 3 – реле часу; 4 – підставка

Для визначення коефіцієнта розмолотості за ВПІ ( $K_{100}$ ) в стандартний лабораторний шаровий млин (з внутрішнім діаметром 270 мм, довжиною 200 мм, частотою обертання 41,4 об/хв) завантажують пробу повітряно-сухого матеріалу крупністю 2,36-3,33 мм у

кількості 500 г і проводиться розмелювання протягом  $\tau = 15$  хв. За цей час млин робить 621 оберт. Продукт розмелювання розсівають на ситі 90 мкм і визначають масу залишку.

При визначенні коефіцієнта розмолотості за ВПІ як еталон приймається ТГК, для якої після подрібнення в стандартних умовах залишок на ситі з отворами 90 мкм становить 69,2 % за масою (наприклад, донецький антрацит).

Коефіцієнт розмолотості ВПІ  $K_{100}$  визначається як відношення питомої поверхні випробовуваного вугілля до питомої поверхні еталонного:

$$K_{100} = \frac{(S_{100}/R_{90})^{2/3}}{(S_{100}^{et}/R_{90}^{et})^{2/3}}, \quad (2)$$

де  $R_{90}$  – повний залишок випробовуваного палива на ситі 90 мкм, виражений у відсотках від маси наважки.

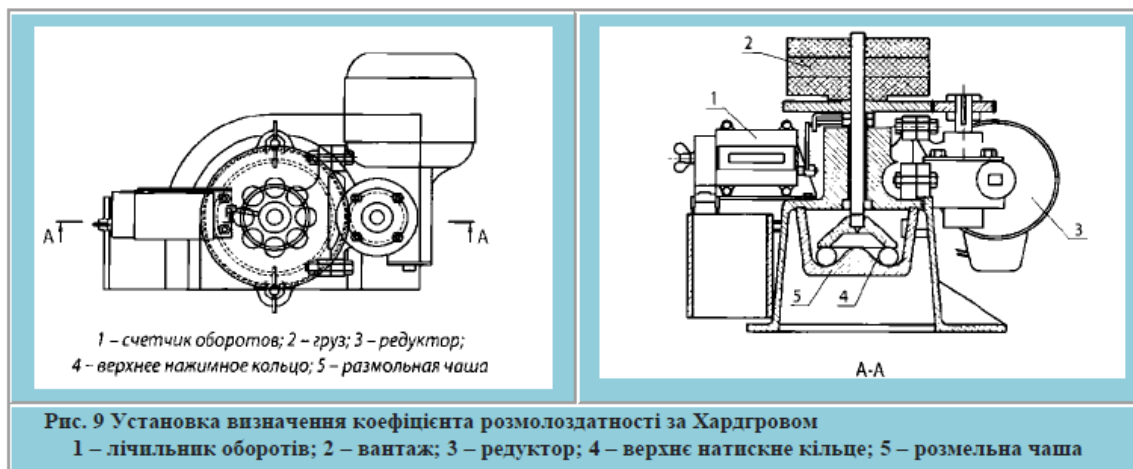
Враховуючи, що  $R_{90}^{et} = 69,2\%$ , отримуємо

$$K_{100} = 1,96(R_{90}/R_{90}^{et})^{2/3} \quad (3)$$

Коефіцієнт розмолотості випробовуваного палива може бути також визначений за графіком тарування, побудованим для даної установки перед проведенням випробувань.

## 2.8. Визначення коефіцієнта розмолотості за Хардгровом

Коефіцієнт розмолотості за Хардгровом (HGI) визначають, виходячи з маси вугілля, що пройшло після випробування через сито з отворами 0,075 мм (0,071 мм) за результатами випробувань чотирьох стандартних зразків [29-32]. Для виконання випробування цим методом використовують апарат, зображений на рис. 9. До складу апарату входить нерухома розмельна чаша із загартованої сталі з кільцевим горизонтальним заглибленням на дні, в якому знаходяться вісім відполірованих сталевих кульок діаметром 25,40 мм. Кульки приводяться до руху верхнім натискним кільцем, яке обертається зі швидкістю  $(20 \pm 1)$  об/хв. Натискне кільце, у свою чергу, рухається за допомогою вертикального валу електричним мотором через знижувальну передачу або, в більш сучасних моделях, через ремінну передачу. На вертикальний вал накладають додаткові вантажі, щоб загальна вертикальна сила, що давить на кульки і складається з ваги вантажів, валу, верхнього натискного кільця і передавального механізму, становила  $(29,0 \pm 0,2)$  кг. Апарат обладнано лічильником обертів та автоматичним пристроєм, котрий регулюють таким чином, щоб зупинити роботу апарату через  $60 \pm 0,25$  обертів валу.



Коефіцієнт HGI визначають за градуювальним графіком або обчислюють за рівнянням градуювальної прямої [31-34]. Остаточний результат випробувань розраховують як середнє арифметичне значення результатів двох визначень, округлене до цілого числа. Збіжність результатів визначення не має перевищувати 2 одиниці, відтворюваність – 3 одиниці.

Математичний аналіз [35] паралельних визначень коефіцієнтів розмолотості за Хардгровом і за методом ВТІ показав наявність між ними нелінійного взаємозв'язку (рис. 10) за рівнянням (2), при кореляційному відношенні 0,87 та залишковому відхиленні 5,6 одиниць. Діапазон від твердого вугілля до м'якого відповідає величинам  $K_{до}$  від 0,77 до 2,5 і HGI від 30 до 146.

$$HGI = 140,7 - 126,4K_{до} + 43,9K_{до}^2 \quad (4)$$

Рівняння (4), справедливе для області значень  $K_{до}=1,3-2,5$  од., дозволяє за необхідності оцінювати коефіцієнт розмолотості за Хардгровом при відомих величинах параметра  $K_{до}$ .

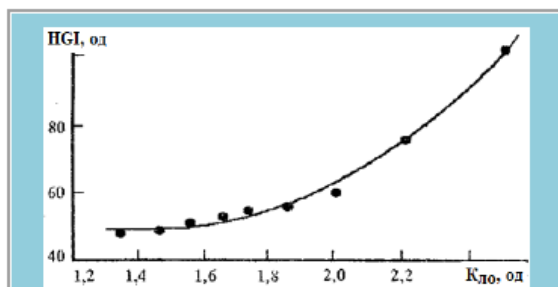


Рис.10 Взаємозв'язок між коефіцієнтами розмолотості за методами Хардгрова (HGI) та ВТІ ( $K_{до}$ )

Для вирішення зворотнього завдання, тобто. розрахунку  $K_{до}$  в області 48-105 одиниць, можна використувати просте співвідношення:

$$K_{до} = (3HGI - 115) / (HGI - 26) \quad (5)$$

Перерахунок величини HGI на шкалу ВТІ можна виконати за формулою [30]:

$$K_{до} = 0,32 + 0,0149 \cdot HGI \quad (6)$$

Залежність між коефіцієнтами розмолотості, визначеними за методом ВТІ ( $K_{до}$ ) та методом Хардгрова (HGI), представлена на рис. 11.

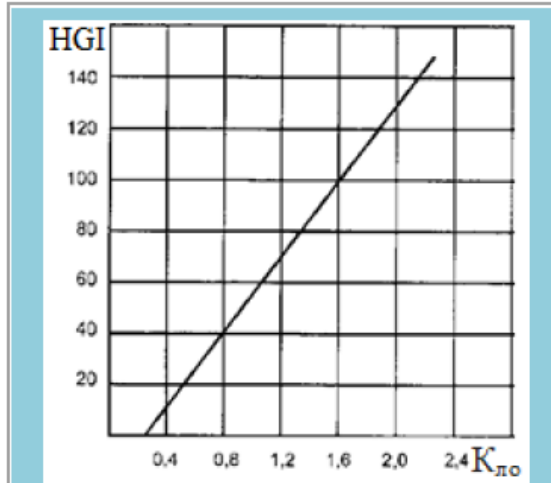


Рис. 11 Взаємозв'язок між коефіцієнтами розмолотості за методами Хардгрова (HGI) та ВТІ ( $K_{до}$ )



Коефіцієнт розмолотості, отриманий у лабораторії для повітряно-сухого вугілля певного гранулометричного складу, може бути перерахований на робочий стан палива, тобто на загальну вологу робочого палива та інший гранулометричний склад [36].

Індекс подрібнюваності вугілля HGI є важливим технологічним параметром для оцінки відносної твердості вугілля різних марок і розуміння їх поведінки під час подрібнення. Разом із тим, цей метод має низку недоліків, до яких відносяться складність підготування проб, наявність вартісного устаткування, тривалість проведення дослідів. Зважаючи на такі проблеми, в минулому було зроблено багато спроб встановити кореляцію HGI з простим аналітичним складом вугілля [37-41] (див. розділ 2.10).

## 2.9. Метод визначення індексів Бонда

Чіткого визначення бажаної продуктивності обладнання та якості продукції з метою зниження капітальних витрат та забезпечення мінімально можливої вартості переробки можна досягти за допомогою методик Ф. Бонда [42, 43]. За допомогою методик визначення індексів Бонда можна розрахувати дробність/абразивність/подрібнюваність мінеральної сировини. Такі розрахунки необхідні для визначення необхідних футурувань кульових млинів та їх продуктивності за даною сировиною.

Проведення випробування.



Рис. 12 Млин для визначення індексів Бонда

Для моделювання замкнутого циклу подрібнення в кульовому або стрижневому млині потрібно щонайме-

нше 15-20 кг матеріалу. Кульовий і стрижневий млини мають по суті однаковий пристрій, до котрого входить або розмольний барабан розміром 12×12 дюймів з шарами, що мелють, або барабан розміром 12×24 дюймів зі стрижнями (рис. 12).

Показник подрібнюваності у методі Бонда, що називається індексом роботи Бонда, обчислюється за формулою:

$$W_1 = 13,76 / \Delta G^{0,82}, \quad (7)$$

де  $\Delta G = (\Delta G + \Delta G_{m-1}) / (n_m + n_{m-1})$  – середня кількість матеріалу, дрібніша за 74 мкм, отримана за останні два цикли розмелювання, віднесена до одного обороту млина.

Індекс роботи Бонда являє собою кількість енергії, необхідну для розмелювання однієї короткої тонни матеріалу (907 кг) зі частинками нескінченно великого розміру до вмісту 80 % класу < 100 мкм ( $D_{100} = 80$  %) в кульовому барабанному млині мокрого подрібнення з барабаном діаметром 2,4 м. Для млинів сухого подрібнення розраховане за формулою (10) значення  $W_1$  збільшується на 30 %.

Таким чином, на підставі отриманих розрахунків можна легко підібрати необхідне промислове обладнання, яке буде максимально ефективним у подрібненні матеріалу за заданих умов (тип матеріалу, що подрібнюється, вимога до подрібнення та ін.).

Метод Бонда широко застосовується за кордоном при розрахунку дробарок та шарових барабанних млинів, що подрібнюють руди кольорових та чорних металів, вапняк, клінкер. Метод досить трудомісткий, тривалість одного аналізу перевищує 8 год [44-46].

## 2.10. Статистичний індекс подрібнюваності вугілля (SGI)

Індекс подрібнюваності вугілля є важливим технологічним параметром для оцінки відносної твердості вугілля різних марок та передбачення їх поведінки під час подрібнення. Такий індекс, званий статистичним індексом подрібнюваності (SGI), може бути корисним при оцінці поведінки не лише при дробленні та подрібненні вугілля, але також для оцінки його здатності пилоутворення під час подрібнення [47-49].

У роботі [50] наведено наступну кореляцію між SGI та даними технічного аналізу вугілля:

$$SGI = 93,25 + (0,256W_t^1 + 0,196W_t^{1,2}) + (3,291A^d - 0,027A^{d2}) - (3,495V^d - 0,087V^{d2}) - (5,515FC^d - 0,083FC^{d2}), \quad (8)$$

де  $W_t^1$ ,  $A^d$ ,  $V^d$  та  $FC^d$  – масовий вміст (у відсотках на повітряний сухий стан) відповідно води, золи, летких речовин та зв'язаного вуглецю. Це рівняння дозволяє проаналізувати вплив кожного з чотирьох факторів технічного аналізу вугілля на його розмолотість. Так, аналізуючи дане рівняння, можна дійти висновку, що зі збільшенням рівня води вугілля його статистичний індекс подрібнюваності зростає. Проте внаслідок

того, що підвищення вологості завжди пов'язане зі збільшенням кількості кисневмісних функціональних груп, відповідальних за зшивання через водневий зв'язок, збільшення SGI незначне.

Наступний фактор у рівнянні відноситься до золи, і можна відзначити, що коефіцієнт SGI має тенденцію до збільшення зі зростанням зольності вугілля. Отже, рівняння принаймні підтверджує, що збільшення вмісту мінеральної речовини спричинить пом'якшення матеріалу.

Наступні фактори –  $V^d$  і  $FC^d$  – негативні, що вказує на те, що обидва мають тенденцію сприяти зменшенню значення SGI. Розглядаючи в першу чергу вплив вмісту летких речовин, можна відзначити, що твердість, оцінювана індексом SGI, збільшується в діапазоні від 20 до 40,2 % вмісту  $V^d$ . Аналогічна тенденція спостерігається і для коефіцієнта  $FC^d$  в діапазоні від 15 до 66 %.

#### Висновки

На підставі проведеного огляду існуючих найрозповсюдженіших методів визначення механічної міцності вугілля можна дійти висновку, що цей показник залежить від великої кількості факторів (в'язкість, крихкість, тріщинуватість, властивості структурних зв'язків, тощо), врахувати зміну котрих неможливо.

Через те, що розкид значень міцності обумовлений в основному природною неоднорідністю вугілля, його міцність необхідно представляти деяким інтегральним показником, чисельне вираження котрого неминуче коливається біля певного середнього значення та може бути визначене лише приблизно.

Лабораторні методи випробувань породинок зразків, порівняно з натурними, з огляду на свою розробленість, здебільшого є доступними і високонадійними.

Зважаючи на те, що найрозповсюдженішим методом оцінки механічних властивостей вугілля є метод визначення розмолотості за Хардгровом і на те, що показник HGI пов'язаний з багатьма показниками якості вугілля (вологістю, зольністю, ступенем метаморфізму, елементним, петрографічним та мінеральним складами, окисненням) з метою подальшого інтегрування вітчизняної науки зі світовою, його доцільно використовувати для визначення механічної міцності вугілля. Даний метод стандартизований, відносно простий в апаратному оформленні, закорельований з іншими показниками механічної міцності та потужністю, що витрачається на подрібнення вугілля дробильними пристроями. Можливе також використання інших методів, що добре корелюють з методом Хардгрова.

#### Бібліографічний список

1. Плачков С.Г. Энергетика: история, настоящее и будущее. Книга 1. От огня и воды к электричеству / И.В. Плачков, Н.И. Дунаевская, В.С. Подсуренко, Б.А.

Шилев, Ю.А. Ландау, И.Я. Сигал, Г. Данилко. – К.: Энергетика: история, настоящее и будущее, 2012-2013. – 589 с.

2. Эпштейн С.А. Обоснование и разработка методов изучения структурных особенностей углей для определения динамики их свойств под влиянием внешних воздействий / С.А. Эпштейн / Автореферат дис. на звание ступеня доктора техн. наук. – Москва: ГОУ ВПО Московский государственный горный университет, 2009. – 39 с.

3. Самойлик В.Г. Классификация твёрдых горючих ископаемых и методы их исследований / В.Г. Самойлик. – Харьков: Водный спектр ДжиЕм-Пи, 2016. – 308 с.

4. Самойлик В.Г. Физико-химические свойства горючих ископаемых и методы их исследования / В.Г. Самойлик. – Донецк: ДонНТУ, 2016. – 149 с.

5. Августевич И.В. Стандартные методы испытания углей. Классификация углей / И.В. Августевич, Т.М. Броневец, Г.С. Головин, Е.П. Сидорук, Л.В. Шуляковская. – Москва: НТК «Трек», 2008. – 368 с.

6. H.J. Sloman. The Relative Grindability of Coal / Harold J. Sloman. Arthur C. Barnhart // Transactions of the American society of mechanical engineers. Fuels and steam power. 2 Pittsburgh, pa. 1958. – Vol. 1. – fsp-56-13, pp 773-779 / [Електронний ресурс] / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://cybra.p.lodz.pl/Content/6300/FSP\\_56\\_13.pdf](http://cybra.p.lodz.pl/Content/6300/FSP_56_13.pdf).

7. Tlotleng M.T. Coal characteristics that lead to abrasion during grinding / M.T. Tlotleng // Engineering, Johannesburg. – 2011 / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://core.ac.uk/download/pdf/39669435.pdf>.

8. Wells J.J. The relationship between excluded mineral matter and the abrasion index of a coal / J.J. Wells, F. Wigley, D.J. Foster, W.H. Gibb, J. Williamson // Fuel. – 2004. – Vol. 83. – Iss. 3. – P. 359-364 / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://www.researchgate.net/publication/222140732\\_The\\_relationship\\_between\\_excluded\\_mineral\\_matter\\_and\\_the\\_abrasion\\_index\\_of\\_a\\_coal](https://www.researchgate.net/publication/222140732_The_relationship_between_excluded_mineral_matter_and_the_abrasion_index_of_a_coal). DOI: 10.1016/S0016-2361(03)00262-X.

9. Hamid Reza Modarres. Prediction of coal grindability based on petrography, proximate and ultimate analysis using neural networks and particle swarm optimization technique / Hamid Reza Modarres, Mohammad Kor, Emad Abkhoshk, Alireza Alfi and James C. Hower. // Energy Exploration & Exploitation. – June 2009, Vol. 27. – No. 3. – P. 201-212. DOI:10.1260/014459809789618821.

10. Jorjani E. Studies of relationship between petrography and elemental analysis with grindability for Kentucky coals / E. Jorjani, James C. Hower, S. Chehreh Chelgani, Mohsen A. Shirazi, Sh.Mesroghli // Fuel. – May 2008. – Vol. 87. – Iss. 6. – P. 707-713. DOI: 10.1016/j.fuel.2007.05.044.



11. Wells J.J. The relationship between excluded mineral matter and the abrasion index of a coal / J.J. Wells, F. Wigley, D.J. Foster, W.H. Gibb, J. Williamson // *Fuel*. – February 2004. – Vol. 83. – Iss. 3. – P. 359-364/ DOI: 10.1016/S0016-2361(03)00262-X.
12. ISO 5074:2015 (en) Hard Coal. Determination of Hardgrove grindability index / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:5074:ed-3:v1:en>
13. ГОСТ 21153.1-75 «Породы горные. Метод определения коэффициента крепости по Прото́дяконову» / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://docs.cntd.ru/document/1200023972>.
14. ГОСТ 21206-75 «Угли каменные и антрацит. Метод определения микротвердости и микрохрупкости» / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://docs.cntd.ru/document/1200024246>.
15. ГОСТ 15490-70 «Угли бурые, каменные, антрацит и термоантрацит. Методы определения механической прочности» / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://docs.cntd.ru/document/1200024173>.
16. ГОСТ 15489.1-93 «Угли бурые, каменные, антрацит и горючие сланцы. Метод определения коэффициента размо́лоспособности по ВТИ» / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://docs.cntd.ru/document/1200024169>.
17. Жемчужников Ю.А. Основы петрологии углей [Текст] / Ю.А. Жемчужников, А.И. Гинзбург – Москва: Изд-во Акад. наук СССР, 1960. – 400 с.
18. Шрейнер Л.А. Твердость хрупких тел / Л.А. Шрейнер. – М.-Л.: Издательство АН СССР, 1949. – 144 с.
19. Перов В.А. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых / В.А. Перов, Е.Е. Андреев, Л.Ф. Биленко. – Москва: Недра, 1990. – 301 с.
20. Агроскин А.А. Физика угля / Анатолий Абрамович Агроскин. – Москва: Недра, 1965. – 352 с.
21. Белецкий В.С. Уголь в современном мире и Украине / В.С. Белецкий / Сб. Донец. Рос. Науч. т-во им. Шевченко. – Т. 3: Химия, технические науки, науки о земле, медицина и психология. – Донецк: ДРНТ, 2003. – С. 58-66.
22. Саранчук В.И. Физико-химические основы переработки горючих ископаемых / В.И. Саранчук, В.В. Ошовский, Г.А. Власов. – Донецк: Східний Видавничий Дім, 2001. – 300 с.
23. Andrew Alden. The Mohs Mineral Hardness Scale / Andrew Alden // *About.com: Geology*. – 2010 / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://geology.about.com/od/scales/a/mohssscale.htm>.
24. Кузниченко В.М. Твердость кокса: выбор метода определения / В.М. Кузниченко, С.С. Кубрак // *Углехимический журнал*. – 2016. – № 1. – С. 3-6.
25. Павлов П.В. Физика твердого тела / П.В. Павлов, А.Ф. Хохлов. – Москва: Высшая школа, 2000. – 494 с.
26. Салтыкова С.Н. Влияние технологических факторов на микротвердость углей / С.Н. Салтыкова, М.Ю. Назаренко // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – № 11. – С. 172-178 / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://izvestiya.tpu.ru/archive/article/view/2363/2113>. DOI: 10.18799/24131830/2019/11/2363.
27. Столбова Н.Ф. Петрология углей / Н.Ф. Столбова, Е.Р. Исаева. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2013. – 77 с.
28. Miroshnichenko D.V. Crushing Properties of Coal 3. Method of Determining the Protod'yakov Strength Coefficient / D. Miroshnichenko, V.Koval, S.Fatenko // *Coke and Chemistry*. – 2021. – Vol. 64 (1). – P. 2-7. DOI: 10.3103/s1068364x2101004x.
29. Прото́дяконов М.М. Исследование хрупкости и вязкости углей. Разрушение углей и пород / М.М. Прото́дяконов. – Москва: Углетехиздат, 1958. – С. 47-82.
30. Справочник коксохимика. Т. I. Угли для коксования. Обогащение углей. Подготовка углей к коксованию [под общ. ред. Борисова Л.Н., Шаповала Ю.Г.]. – Харьков: ИД ИНЖЭК, 2010. – 536 с.
31. Rattanawin Chairroj. Characteristics of Mae Moh lignite: Hardgrove grindability index and approximate work index / Chairroj Rattanawin, Wutthiphong Tara. // *Songklanakarin Journal of Science and Technology*. – Jan.-Feb. 2012. – № 34 (1). – P. 103-107.
32. Tichánek F. Contribution to determination of coal grindability using Hardgrove method. Příspěvek ke stanovení melitelnosti uhlí metodou Hargrove / František Tichánek // *GeoScience Engineering*. – Volume LIV (2008). – No.1. – P. 27-32.
33. Khoshjavan S. Evaluation of the effect of coal chemical properties on the Hardgrove Grindability Index (HGI) of coal using artificial neural networks / S. Khoshjavan, R. Khoshjavan, B. Reza. // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2225-62532013000600009](http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2225-62532013000600009).
34. Alamin Idris. Grindability and abrasive behavior of coal blends: analysis and prediction / Alamin Idris, Zakaria Man, Azmi Bustam, Nurul Ekmi Rabat, Fahim Uddin, Hafiz Abdul Mannan // *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. – Nov. 2019 / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/19392699.2019.1694009>. DOI: 10.1080/19392699.2019.1694009.
35. Федорова Н.И. Петрографический анализ бурых углей / Н.И. Федорова, Н.А. Грабовая, З.Р. Исмаилов



// Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2019. – № 4. – С. 70-76. DOI: 10.26730/1999-4125-2019-4-70-76.

36. Лебедев А.Н. Подготовка и разлом топлива на электростанциях / А.Н. Лебедев. – Москва: Энергия, 1969. – 520 с.

37. Li Peisheng. Prediction of Grindability with Multivariable Regression and Neural Network in Chinese coal / Li Peisheng, Xiong Youhui, Dunxi Yu, Sun Xuexin // Fuel. – 2005. – Vol. 84. – No. 3-4. – P. 359-368.

38. Khoshjavan S. Estimation of Hardgrove grindability index (HGI) based on the coal chemical properties using artificial neural networks / S. Khoshjavan, M. Mazlumi, M. Rezai // Oriental Journal of Chemistry. – 2010. – Vol. 26 (4). – P. 1271-1280.

39. Urala S. Studies of the Relationship between Mineral Matter and Grinding Properties for low-rank coals / S. Urala, M. Akyildiz // International Journal of Coal Geology. – 2004. – Vol. 60. – No. 1. – P. 81-84.

40. Radic D.B. A study on the grindability of Serbian coals / D.B. Radic, M.O. Obradovic, M.M. Stanojevic, A.M. Jovovic, D.D. Stojiljkovic // Thermal science. – 2011. – Vol. 15. – No. 1. – P. 267-274. DOI: 10.2298/TSCI1101267R.

41. Wall T. A review of the state of the art in coal blending for power generation final report. Project 3.16 / T. Wall, L. Elliott, D. Sanders, A. Conroy. – Advanced technology Centre. The University of New Castle. University drive Callaghan. Australia, May. 2001. – 93 p. / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.yumpu.com/en/document/read/17591812/a-review-of-the-state-of-the-art-in-coal-blending-for-power-ccsd>.

42. Андреев Е.Е. Дробление, изучение и подготовка сырья к обогащению. Учебник. / Е.Е. Андреев, О.Н. Тихонов // Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный институт, 2007. – 439 с.

43. Bond F.C. Crushing and grinding calculations. Part I // British Chemical Engineering. – 1961. – Vol. 6. – No. 6. – P. 378-385.

44. Львов В.В. Моделирование рабочего индекса шарового измельчения Бонда / В.В. Львов, Л.С. Читалов //

Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – С. 242-246 / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-rabochego-indeksa-sharovogo-izmelcheniya-bonda>.

45. Таранов В.А. Оценка прочностных свойств руды как фактор повышения эффективности процесса измельчения / В.А. Таранов, Т.Н. Александрова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – С. 119-123 / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-prochnostnyh-svoystv-rudy-kak-faktor-povysheniya-effektivnosti-protsessa-izmelcheniya>.

46. Тихонов Н.О. Расчет мельниц подсамоизмельчения по энергетическим индексам хонгов / Н.О. Тихонов, О.И. Скарин // Горный журнал. – 2014. – № 11. – С. 6-10.

47. Leonel J.R. Nimes Torrefied Biomass as an Alternative in Coal-Fueled Power Plants: A Case Study on Grindability of Agroforestry Waste Forms / J.R. Leonel // Clean Technologies. – 2020. – № 2. – P. 270-289. DOI: 10.3390/cleantechnol2030018.

48. Eswarajah C. Minimization of fines generation in size reduction of coals by impact crusher / C. Eswarajah, Anshul Gupta, R. Nagarajan, M. Rajavel, K. Nandakumar // Fuel Processing Technology. – July 2008. – Vol. 89, Iss. 7. – P. 704-714. DOI: 10.1016/j.fuproc.2008.01.001

49. Williams O. Investigation into the applicability of Bond Work Index (BWI) and Hardgrove Grindability Index (HGI) tests for several biomasses compared to Colombian La Loma coal / O. Williams, C. Eastwick, S. Kingman, D. Giddings, S. Lormor, E. Lester // Fuel. – 2015. – Vol. 158. – P. 379-387. DOI: 10.1016/j.fuel.2015.05.027.

50. Sengupta A.N. An assessment of Grindability index of coal / A.N. Sengupta // Fuel processing Technology. – 2002. – Vol. 76. – No. 1. – P. 1-10. DOI: 10.1016/S0378-3820(01)00236-3.

Рукопис надійшов до редакції 05.10.2021

DOI: 10.31081/1681-309X-2021-0-6-4-17

Specialty 161. U.D.C. 662.642/667:662.71

## MECHANICAL STRENGTH OF COAL: METHODS OF DETERMINATION AND FACTORS OF INFLUENCE (REVIEW)

© V.V. Koval, D.V. Miroshnichenko, Doctor of Technical Sciences (State Enterprise "Ukrainian State Research Institute for Carbochemistry (UKHIN)", 61023, Kharkov, Vesnina st., 7, Ukraine), O.V. Bogoyavlenska, PhD in technical sciences (National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", 61002, Kharkiv, Kirpicheva st., 2, Ukraine)

The article substantiates the importance and problems of determining of such an indicator of the quality of solid fossil fuels, as mechanical strength. The strength of coal depends on a large number of factors (viscosity, brittleness, properties of structural bonds, etc.), the change of which is impossible to take into



account. Therefore, the strength of coal in the sample, piece, pack and formation must be represented by some integral index, which inevitably fluctuates around a certain average value and can be determined only approximately. The evaluation of the strength properties of coal should be carried out on the basis of mass tests using statistical methods that allow to calculate the average value and coefficient of variation. Since the strength dispersion is mainly due to the natural inhomogeneity of the coal, the excessive accuracy of the measuring instruments has almost no effect on the statistical characteristics. Laboratory methods of mechanical tests of mine samples, in comparison with full-scale, as a rule, are very accessible and, at qualitative performance of tests, are highly reliable.

The properties of coal as an object of enrichment and use are largely related to its physical properties. The physical properties of coal and mineral impurities significantly affect the formation of the main parameters that characterize the particle size distribution and fractional composition, it's changes during the mining, transportation and enrichment processes.

The basic physical and mechanical properties of solid fuels from the point of view of their industrial processing have been listed, the review has been made of the most widespread methods of study of coals mechanical durability and the equipment used for these purposes. The main advantages and disadvantages have been summarized of these methods, as well as their relationship. The factors have been indicated influencing the mechanical strength of coal. The expediency of using existing methods from the point of view of informativeness for the sphere of its application has been estimated. The methods common in the coal processing industry are considered in more detail.

Keywords: coal, solid fuel mining, mechanical strength, determination methods, influencing factors, grinding strength, crushing index.

Corresponding author V.V. Koval, e-mail: [kovalen79@gmail.com](mailto:kovalen79@gmail.com)

DOI: 10.31081/1681-309X-2021-0-6-4-17

Специальность 161. УДК 662.642/667;662.71

#### МЕХАНИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ УГЛЯ: СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ФАКТОРЫ ВЛИЯНИЯ

© В.В. Коваль, Д.В. Мпрошниченко, д.т.н. (Государственное предприятие «Украинский государственный научно-исследовательский углехимический институт (УХИН)», 61023 г. Харьков, ул. Веснина, 7, Украина), Е.В. Богоявленская, к.т.н. (Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», 61002, г. Харьков, ул. Кирпичева, 2, Украина)

В статье обоснованы важность и проблемы определения такого показателя качества твердых горючих ископаемых (ТГИ), как механическая прочность. Показано, что прочность угля зависит от большого количества факторов (вязкость, хрупкость, трещиноватость, свойства структурных связей и т.п.), учесть изменение которых невозможно. Поэтому прочность угля в пробе, куске, пачке и пласте необходимо представлять неким интегральным показателем, численное выражение которого неизбежно колеблется около определенного среднего значения и может быть определено лишь приблизительно. Оценка прочностных свойств угля должна осуществляться на основе масштабных испытаний с применением статистических методов, позволяющих вычислить среднее значение и коэффициент вариации. Поскольку разброс значений прочности обусловлен в основном естественной неоднородностью угля, повышение точности измерительных приборов практически не влияет на статистические характеристики. Лабораторные методы механических испытаний породных образцов, по сравнению с натурными, ввиду своей разработанности, как правило, очень доступны и высоконадежны при качественном выполнении испытаний.

Свойства угля как объекта обогащения и использования в значительной степени связаны с его физическими свойствами. Физические свойства угля и минеральных примесей оказывают существенное влияние на формирование основных параметров, характеризующих гранулометрический и фракционный составы, изменения последних в процессах добычи, транспортировки и углеобогащения.

В статье освещены основные физико-механические свойства ТГИ с точки зрения их промышленной переработки, проведен обзор основных методов определения их механической прочности и используемого оборудования. Указаны основные преимущества и недостатки этих методов, а также их взаимосвязь. Указанные факторы влияют на механическую прочность угля. Оценена



целесообразность использования существующих методов с точки зрения информативности результатов исследования прочностных свойств материала относительно сферы его применения. Детальнее рассмотрены методы, распространенные в углеперерабатывающей отрасли.

Ключевые слова: уголь, твердые горючие ископаемые (ТГИ), механическая прочность, методы определения, факторы воздействия, коэффициент размоловоспособности, индекс измельчаемости.

Автор для корреспонденции В.В. Коваль, e-mail: [kovalen79@gmail.com](mailto:kovalen79@gmail.com)

DOI: 10.31081/1681-309X-2021-0-6-17-22

Спеціальність 161. УДК 669:696.135

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТВЕРДИХ ЗАВИСЛИХ РЕЧОВИН У ВОДАХ, ЩО НАДХОДЯТЬ НА ГАСІННЯ КОКСУ

© О.Л. Борисенко<sup>1</sup>, О.С. Малиш<sup>2</sup>, М.І. Близнюкова<sup>3</sup>

Державне підприємство «Український державний науково-дослідний вуглехімічний інститут (УХІН)», 61023, м. Харків, вул. Веснина, 7, Україна

Є.М. Попов<sup>4</sup>

ПрАТ «Авдіївський коксохімічний завод», 86065, м. Авдіївка, пр. Індустріальний, 1, Україна

<sup>1</sup>Борисенко Олександр Людвинович, канд. техн. наук, с.н.с., заст. директора з наукової роботи та управління системою якості досліджень, e-mail: [zd@ukhin.org.ua](mailto:zd@ukhin.org.ua)

<sup>2</sup>Малиш Олександра Сергіївна, канд. техн. наук, с.н.с., провідний наук. співр. відділу аналітичних досліджень, стандартизації, метрології і екології (ВАДСМіЕ), e-mail: [zx@ukhin.org.ua](mailto:zx@ukhin.org.ua)

<sup>3</sup>Близнюкова Марина Іванівна, інженер-технолог I категорії ВАДСМіЕ, e-mail: [zx@ukhin.org.ua](mailto:zx@ukhin.org.ua)

<sup>4</sup>Попов Євген Миколайович, старший менеджер технічного відділу, e-mail: [jonnice2005@ukr.net](mailto:jonnice2005@ukr.net)

У статті висвітлено результати робіт щодо вивчення складу і кількісного вмісту твердих завислих речовин (ТЗР) у стічних водах коксохімічних підприємств до і після установок біохімічного очищення (БХО), а також і в інших водах, що залучаються до процесу гасіння коксу. Досліджено і наведено характеристичні показники вод до і після БХО п'яти коксохімічних підприємств України, хімічний склад завислих речовин у воді після БХО та ін.

Показано, що ТЗР у воді після БХО репрезентовані переважно активним мулом, який під час контакту води з гарячим коксом частково окиснюється до  $CO_2$ . Залишок активного мулу повертається з водним конденсатом у відстійник башти гасіння і, таким чином, не викидається в атмосферне повітря у вигляді ТЗР.

Окрім мулу, в очищеній воді після БХО й у воді відстійника гасильної башти присутні у завислому стані частинки коксу та вугілля, а також продуктів корозії апаратури. Не виключена й імовірність наявності у складі ТЗР частинок бетону. Для встановлення природи твердих частинок визначено їх елементний склад і склад їх золи. Зокрема встановлено, що склад золи завислих речовин з води після БХО кількісно відрізняється від складу золи вугільних концентратів і від складу бетону. Так, масова частка діоксиду кремнію у завислих речовинах води після БХО значно нижча, ніж в бетоні та в золі вугільних концентратів. Виявлене переважання оксиду заліза (III) в складі золи ТЗР після БХО пояснюється присутністю у відібраних пробах продуктів корозії апаратури.

На підставі проведених нами досліджень запропоновано внести зміни в нормативний документ «Технологічні нормативи допустимих викидів забруднюючих речовин від коксових печей», а саме: з розділу IV «Умови експлуатації коксових печей», п.8, виключити таку нормативну величину, як вміст твердих завислих речовин у воді після БХО, котра подається на гасіння коксу.

Ключові слова: вода на гасіння коксу, вода після біохімічного очищення, тверді завислі речовини (ТЗР), вміст, хімічний склад, елементний склад, склад золи.

Автор для листування О.Л. Борисенко, e-mail: [zd@ukhin.org.ua](mailto:zd@ukhin.org.ua)

\*\*\*\*\*



ІН УХІН