НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

В.В. Коваль, Д.В. Мірошниченко, О.В. Богоявленська

ОПТИМІЗАЦІЯ СХЕМИ ПІДГОТОВКИ ВУГІЛЛЯ ДО КОКСУВАННЯ

Монографія

Рекомендовано Вченою радою
Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут»

Харків 2023

УДК 662.74
К 56

Рецензенти:

С.В. Пиш'єв, доктор технічних наук, професор, професор кафедри хімічної технології переробки нафти та газу НУ «Львівська політехніка».

Є.І. Малий, доктор технічних наук, доцент, професор кафедри металургійного палива та відновників Національной Металургійної Академії України.

Рекомендовано Вченою радою НТУ «ХПІ»
(протокол № 9 від 31.11.2023 року)

Коваль В.В.
Оптимізація схеми підготовки вугілля до коксування: монографія / В.В. Коваль, Д.В. Мірошниченко, О.В. Богоявленська. – Харків : НТУ «ХПІ», Видавництво «Крок», 2023 – 136 с.

ISBN 978-617-692-831-7

Монографія спрямована на розвиток наукових основ і уявлень щодо оптимізації схеми підготовки вугільної шихти до коксування з точки зору визначення розмолоздатності вугільної шихти виходячи з розмолоздатності її компонентів.

УДК 662.74

ISBN 978-617-692-831-7

© В.В. Коваль, Д.В. Мірошниченко, О.В. Богоявленська
© Видавництво «Крок»

ЗМІСТ

Стор.

Передмова…… 6

ВСТУП……. 8

РОЗДІЛ 1. МЕХАНІЧНА МІЦНІСТЬ ВУГІЛЛЯ: МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ТА ФАКТОРИ ВПЛИВУ…… 9

1.1 Фізичні властивості……. 9

1.2 Методи визначення механічної міцності…….. 10

1.2.1 Вплив різних факторів на механічну міцність ТГК……. 10

1.2.2 Міцність матеріалу за Моосом…… 12

1.2.3 Метод визначення мікротвердості та мікрокрихкості……. 14

1.2.4 Визначення механічної міцності випробуваннями у обертовому барабані……... 16

1.2.5 Визначення механічної міцності ТГК методом товчення…… 18

1.2.6 Принцип визначення механічної міцності вугілля методом ВІМС…… 20

1.2.7 Метод визначення коефіцієнта розмолоздатності – ВТІ……. 21

1.2.8 Визначення коефіцієнта розмолоздатності методом Хардгрова……. 22

1.2.9 Метод визначення індексів Бонда…….. 26

1.2.10 Статистичний індекс подрібнюваності вугілля (*SGI*)…… 28

ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 1……. 30

РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ…….. 31

2.1 Використані методи вивчення складу та властивостей вугілля та вугільних шихт……... 31

2.2 по Хардгрову згідно з ISO 5074:2015 «Кам'яне вугілля. Визначення коефіцієнта розмолоздатності по Хардгрову»…… 31

2.3 Визначення коефіцієнта механічної міцності за методом товчення Протод’яконова…….. 35

2.4 Визначення спікливості та спікливої здатності вугілля і вугільних шихт засноване на визначенні міцності спеку вугілля (шихти) на зріз з антрацитом, що додається в вугілля в різних співвідношеннях……. 38
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 2…….. 43
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ОСНОВНИХ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ВУГІЛЛЯ НА ПОКАЗНИКИ ЙОГО МЕХАНІЧНОЇ МІЦНОСТІ…… 44
3.1 Вплив основних показників якості вугілля на коефіцієнт його розмолоздатності за методом Хардгрова……. 45
3.2 Вплив основних показників якості вугілля на показник його механічної міцності по Протод'яконову…….. 54
3.3 Встановлення взаємозв'язку між коефіцієнтом міцності за методом Прото`яконова та коефіцієнтом розмолоздатності вугілля за методом Хардгрова……. 65
3.4. Визначення спікливості і спікливої здатності вугілля……. 68
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 3……. 76
РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗМОЛОЗДАТНОСТІ БІНАРНИХ ВУГІЛЬНИХ СУМІШЕЙ…….. 78
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 4……. 94
РОЗДІЛ 5. ПРОГНОЗ РОЗРАХУНКУ КОЕФІЦІЄНТУ РОЗМОЛОЗДАТНОСТІ ВУГІЛЬНИХ ШИХТ…… 95
5.1 Формулювання основних принципів визначення розмолоздатності реальних промислових вугільних шихт основних коксохімічних підприємств України методом Хардгрова. 95
5.2 Вплив сформульованих принципів визначення розмоло-здатності за методом Хардгрова на оптимізацію роботи подрібнюючого відділення вуглепідготовчих цехів коксохімічних підприємств України……. 109

5.3 Розрахунок очікуваної економічної ефективності виконаного дослідження…… 115
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 5……. 119
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ…… 120
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ…….. 123

ПЕРЕДМОВА

Робота спрямована на визначення впливу розмолоздатності вугільної шихти на схему підготовки вугілля до коксування за рахунок оптимізації роботи дробильного відділення.

В монографії наведено результати досліджень, за якими встановлено зв'язок між коефіцієнтом міцності за методом Протод'яконова та коефіцієнтом розмолоздатності вугілля за методом Хардгрова. Показано, що коефіцієнт розмолоздатності Хардгрова та коефіцієнт міцності Протод'яконова задовільно класифікують вугілля за рівнем їхнього опору подрібнюючим зусиллям. Розраховано значення коефіцієнтів розмолоздатності по Хардгрову та коефіцієнтів міцності за Протод'яконовим неокисленого (відновленого) коксівного вугілля окремих марок та груп у рамках ДСТУ 3472:2015 «Вугілля буре, кам'яне та антрацит. Класифікація».

Встановлено наявність систематичних відхилень фактичних значень коефіцієнта розмолоздатності Хардгрова *HGI* вугільних шихт при їх сумісній підготовці від їх розрахункових значень в сторону зменшення коефіцієнта *HGI* (до твердішого вугілля). Встановлено також, що зі зростанням експериментально отриманих коефіцієнтів розмолоздатності їх відхилення від розрахункових значень зменшуються.

Графічно-математичні залежності, розроблені авторами, дозволяють прогнозувати коефіцієнт розмолоздатності вугілля за методом Хардгрова (*HGI*) та коефіцієнт міцності вугілля за методом Протод'яконова (*f*) на основі визначення показників його якості (R_0, V^{daf}, C^{daf}, O^{daf}_d).

З метою оптимізації схеми підготовки вугілля до коксування сформульовано принципи прогнозування величини коефіцієнту розмолоздатності вугільної шихти. Виявлена математична залежність, що дозволяє прогнозувати значення коефіцієнта розмолоздатності Хардгрова *HGI* бінарних та багатокомпонентних вугільних шихт за даними коефіцієнтів розмолоздатності окремих її компонентів.

Авторами доведено, що дана залежність дає змогу значно точніше прогнозувати коефіцієнт розмолоздатності вугільних шихт, ніж раніше використовувані формули розрахунку залежності *HGI* від V^{daf} та за методом адитивності.

Сукупність результатів теоретичних та експериментальних досліджень дає можливість обґрунтування методів прогнозу розрахунку коефіцієнту розмолоздатності вугільних шихт в залежності від розмолоздатності їх компонентів та створення коректної моделі процесу підготовки вугілля до коксування.

ВСТУП

Підготовка вугілля до коксування залишається однією з основних технологічних операцій, які суттєво впливають на показники механічної міцності коксу і енергоємність вуглепідготовчих цехів. Використання в шихті для коксування петрографічно неоднорідного вугілля зумовлює перехід від дроблення всієї шихти до диференційованого або групового дроблення компонентів. Підготовка вугілля до спалювання або коксування є важливою ланкою в технологічному ланцюжку підприємства, а спосіб подрібнення вугілля має великий вплив на якість і кількість продукції. Здатність коксу виконувати функції в доменному процесі обумовлюється сукупністю та рівнем його хімічних, фізико-хімічних та фізичних властивостей. При цьому якість коксу та його стабільність вирішальною мірою залежать від складу вугільної шихти, ефективності її підготовки та меншою мірою – від режиму коксування. У зв'язку з цим одним із першорядних у низці заходів, спрямованих на покращення якісних показників коксу, є оптимізація якості вугільних шихт шляхом досягнення оптимальних показників вологості, зольності, ступеня дроблення, а також забезпечення високого ступеня змішування вугільних концентратів, що входять до вугільної шихти для коксування.

Оптимізація схеми підготовки вугілля до коксування, застосування прогресивних схем дозволить в умовах міжбасейнової сировинної бази коксування істотно знизити енерговитрати на подрібнення вугільної шихти, коректно налаштувати подрібнююче обладнання з метою недопущення передроблення спікливої основи вугілля, підвищити насипну щільність шихти, разове завантаження камери коксування і показники механічної міцності отримуваного доменного коксу.

РОЗДІЛ 1
МЕХАНІЧНА МІЦНІСТЬ ВУГІЛЛЯ: МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ТА ФАКТОРИ ВПЛИВУ

1.1 Фізичні властивості

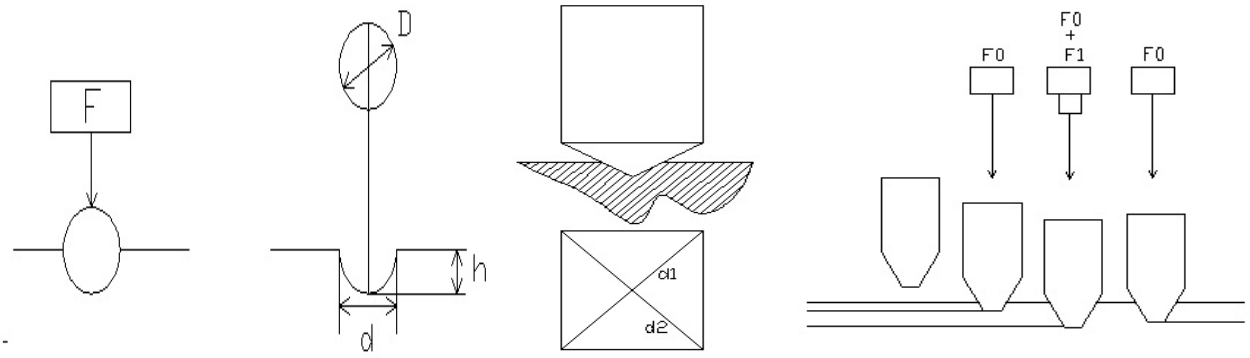
Фізичні та механічні властивості твердих горючих копалин (ТГК) не тільки визначають умови їх видобутку (опір різанню, допустимий розмір вугільної крихти, що залишається в шахті, стійкість бортів кар'єрів), але й подальші умови їх переробки та використання. Гранулометричний склад видобутого палива, вміст дрібної фракції, вихід палива за марками і витрати на підготовку пилу для виробництва електро- та теплової енергії певною мірою залежать від міцності ТГК; механічні властивості і гранулометричний склад ТГК визначають його збагачуваність, підготовку вугілля до коксування і вихід відповідного класу для напівкоксування та видів збагачення [1-12].

Механічна міцність, крихкість і подрібнюваність вугілля і супутніх порід пов'язані з гранулометричним складом, шламоутворенням і впливом абразивів на робочу поверхню. З точки зору механічної міцності вугілля та супутніх порід оцінюється їх термічною стійкістю, яка відображає їх подрібнюваність, твердість, крихкість, тимчасовий опір стисненню і опір зовнішнім силам при високих температурах. Попередні дослідження показали, що зі збільшення метаморфізму твердість вугільного матеріалу зростає, а швидкість дроблення спочатку збільшується, а потім зменшується, що пов'язано зі зменшенням виходу летких речовин. Таким чином, низько метаморфізоване вугілля є помірно міцним, але в'язкішим; середньо метаморфізоване вугілля (через добре розвинену тріщинуватість) – найслабшим; а високо метаморфізований антрацит – найтвердішим і найміцнішим [2, 3].

На вибір способу вимірювання твердості впливають такі фактори, як об'єми вимірювань, твердість зразка, що вимірюється, його лінійні розміри,

форма, та ін. З цієї причини з’явилися різні методи вимірювання твердості. Вони майже всі регламентовані ІСО та ДСТУ [8, 9].

Умовно твердість поділяють на мікротвердість, твердість (від 0,049 Н до 4,9 Н навантаження) та макротвердість (понад 49 Н навантаження). Зазвичай твердість ТГК визначають за допомогою пристроїв Брінеля, Вікерса (алмазна пірамідка) або Роквела, котрими вимірюють опір зразка роздавлюванню при статичних навантаженнях (рис. 1.1).



а б в

а – за Брінелем, б – за Вікерсом, в – за Роквелом

Рис. 1.1 – Методи визначення твердості ТГК

Твердість також можна визначити за методом Шора (метод склероскопії), який визначає втрату кінетичної енергії, що поглинається при ударі падаючого металевого предмета об зразок, за висотою відскоку.

1.2 Методи визначення механічної міцності

1.2.1 Вплив різних факторів на механічну міцність ТГК

Як зазначалося вище, численні дослідження показали, що міцність вугілля суттєво змінюється залежно від ступеня його вуглефікації та літологічного складу. На рис. 1.2 представлені результати вимірювань механічної міцності вугілля Кузнецького басейну на різних стадіях

метаморфізму [3]. У цьому випадку механічну стійкість вимірювали на ситі з розміром вічок 2,5 мм після 500 обертів барабана.

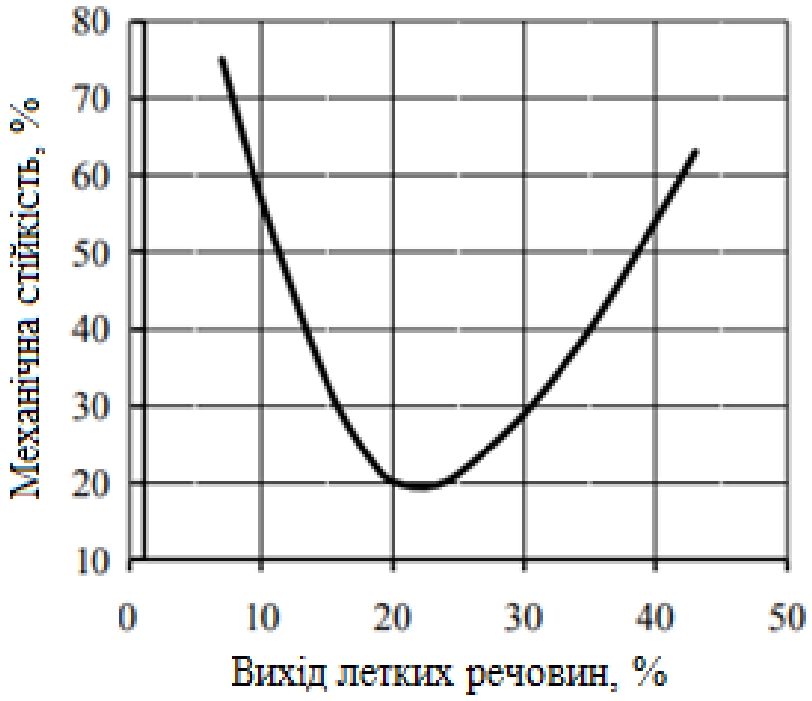


Рис. 1.2 – Опір дробленню вугілля залежно від стадій його метаморфізму.

З отриманих результатів видно, що опір вугілля роздавлюванню змінюється по кривій з мінімумом в області марок вугілля Ж і К в залежності від виходу летких речовин, і, що характер цієї кривої визначається змінами в хімічній структурі вугілля.

Характер зростання міцності вугілля на крайніх стадіях карбонізації різний. Зростання міцності високометаморфізованого вугілля пояснюється збільшенням міцних між’ядерних зв'язків, створених валентністю вуглецю, і зростанням паралельних вуглецевих мереж, орієнтованих у вигляді пакетів.

Вугілля з високим вмістом кисню зазвичай малометаморфізоване і має більшу внутрішню поверхню і вищу механічну міцність. Як наслідок, зв'язки між макромолекулами в такому вугіллі є жорсткими. Однак структурна жорсткість в цьому випадку обумовлена не валентністю вуглецю, а зв’язками кисню. Вважається, що зниження міцності при переході до

середньовуглефікованого вугілля пов'язане зі скороченням розмірів бічних ланцюгів полімерів і виведенням кисню у вигляді води і вуглекислого газу. Це послаблює структуру за рахунок зменшення кількості хімічних зв’язків і ролі водневих зв’язків через зшивання киснем. Вугільні породи ріжуться нерівномірно. Найнижча механічна міцність характерна для фюзенітів. Дещо вищу міцність мають вітрен і кларен. Найскладнішим для подрібнення є споровий дюрен, в якому елемент форми відіграє роль армуючого компонента органічної маси вугілля.

1.2.2 Міцність матеріалу за Моосом

Деякими авторами [10, 11] поняття твердості трактується як опір одного об’єкта проникненню іншого, тобто пов’язують цю міру з силою локального вдавлення. Цей підхід набув популярності після того, як у 1822 році німецький мінералог Фрідріх Моос запропонував шкалу твердості. Згідно з цією шкалою, твердість матеріалу визначається тим, який з 10 стандартних матеріалів пошкоджується вимірюваним матеріалом і який пошкоджується вимірюваним матеріалом. За Моосом міцність матеріалу залежить від ступеня зв'язаності внутрішньої атомної структури матеріалу. В таблиці 1.1 наведена твердість деяких еталонів за шкалою Мооса [12].

Міцність інших речовин, які не охоплені цією шкалою, визначається за допомогою набору еталонних речовин і притискання їх до поверхні досліджуваної речовини. Якщо еталонний матеріал на поверхні речовини, що досліджується, залишає подряпини, то відносна міцність цієї речовини нижча, ніж у еталонного матеріалу.

Значення коефіцієнта міцності речовини, що подрібнюється в кульовому млині, в більшості випадків знаходяться в діапазоні від 6 до 9 за шкалою твердості Мооса. Кам’яновугільна твердість за шкалою Мооса знаходиться в межах від 2 до 5.

Таблиця 1.1

Шкала еталонів твердості мінералів 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

Цей метод використовується на практиці в багатьох лабораторіях. Водночас, однак, Л.А. Шрайнер вказував на складність методології та самого процесу дряпання.

Він стверджував, що подряпини є більш складним процесом руйнування, ніж вдавлення, і що питомі людино-години руйнування не можуть бути розраховані, оскільки точно виміряти внутрішній об’єм подряпини не можливо. А.А. Агроскін також вказував, що сам процес подряпини є складною функцією абразивних, пружних і пластичних властивостей. Застосування методів індентування та зміцнення до неоднорідних за структурою матеріалів, які характеризуються різноманіттям властивостей, є або дуже проблематичним або, навіть, неможливе [13]. Враховуючи виражену яскраву неоднорідність властивостей та складу

поверхонь ТГК, варто використовувати метод визначення механічних властивостей, що дав би можливість максимально виокремити й відчувати найтонші неоднорідності зразків.

1.2.3 Метод визначення мікротвердості та мікрокрихкості

Способом, що дає змогу максимально виокремити й відчувати найтонші неоднорідності зразків є метод визначення мікротвердості та мікрокрихкості, регламентований ГОСТ 21206-75. Даний стандарт поширюється на кам'яне та антрацитове вугілля і встановлює метод визначення мікрокрихкості й мікротвердості вітриніту у кам'яному та антрацитовому вугіллі в брикетах і шматках. Суть методу полягає у вимірюванні діагоналей квадратних відбитків, які залишаються на поверхні досліджуваного зразка після вдавлення алмазного наконечника чотиригранної піраміди з прикладеним навантаженням протягом певного періоду. [14]. Методи вимірювання мікротвердості та крихкості вугілля та антрациту призначені для порівняльної оцінки їх фізичних і механічних властивостей (як то, подрібнюваності, механічної міцності, роздавлюваності) з використанням невеликих кількостей середньошарових зразків. Мікротвердомір ПМТ-3 є приладом для вимірювання мікротвердості (рис. 1.3).

Даний прилад складається з вертикального штатива мікроскопа 8 з тубусом, який гвинтом 6 можна переміщати вище або нижче і метричного гвинта 5. До верхнього кінця тубуса кріпиться окуляр-мікрометр 7, а до нижнього – тубус 2 з алмазною пірамідою, затемнювачем 9 і об'єктивом 11 для спостереження мікрозерен при 135-кратному і 478-кратному збільшенні. Ілюмінатор обладнаний лампочкою напругою 6 В, що живиться від трансформатора. Мікрометричні гвинти 13 служать для переміщення столика мікроскопа в необхідному напрямку. Ручка 1 служить для повороту столика на 90°. Прилад оснащений двома окулярами. Система окулярів збільшує зображення в 15 разів. Окулярний мікрометр має каретку з нерухомою сіткою, мікрометричний барабан і рухому сітку.

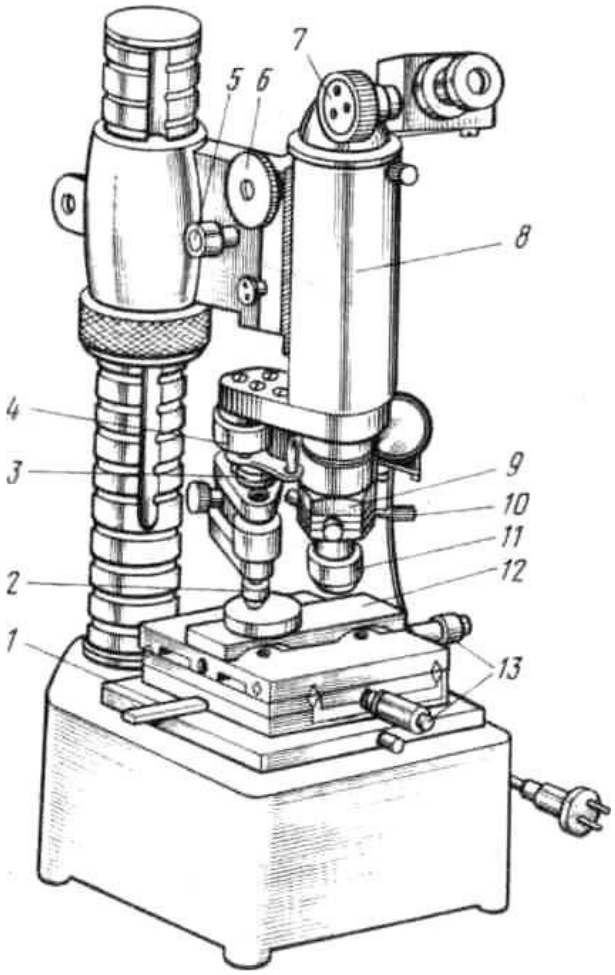


Рис. 1.3 – Схема приладу ПМТ-3.

Ця сітка має довжину 5 мм і штрихи з цифрою і прямокутником, вершина якого збігається з нулем. Рухома сітка має прямокутник з двома риски.

Показники мікротвердості та крихкості мають складний характер та залежать від ступеня метаморфізму вугілля. Найбільші значення крихкості вугілля спостерігаються в інтервалі відбивної здатності вітриніту (*Ro*), де щільність вугілля є мінімальною (*Ro* = 0,85-2,5 %). На даному інтервалі вугіллю властиві найвищі значення електричного опору. Мікротвердість зростає у вугіллі в діапазоні *Ro* = 0,5-1,0 %, зменшується до метаморфічної стадії, що відповідає *Ro* = 1,5 %, а потім знову починає зростати.

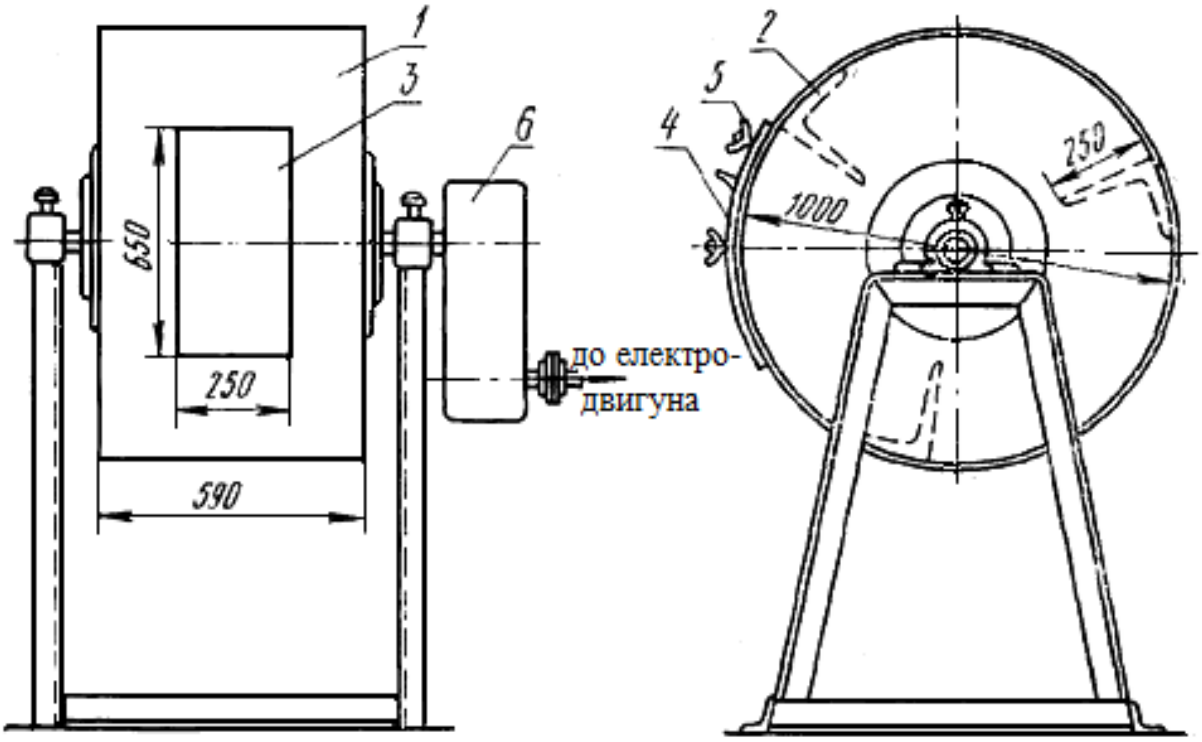
Мікротвердість компонента групи вітриніту визначається як 200-350 МПа залежно від карбонізації та генетичних факторів; мікротвердість

компонентів семівітринітної групи – 250-420 МПа; компонентів інертинітної групи – 500-2300 МПа, а ліптинітної групи – 80-250 МПа.

1.2.4 Визначення механічної міцності випробуваннями у обертовому барабані

Механічною міцністю визначається наскільки ТГК протистоїть роздавленню різними методами. Відповідно до ГОСТ 15490-70 «Вугілля буре, кам'яне, антрацит та термоантрацит. Методи визначення механічної міцності» матеріал, що досліджується обробляють в закритому барабані для визначення виходу класу вище нижньої межі крупності досліджуваного зразка.

Для випробування великорозмірних сортів використовують закриті сталеві барабани довжиною 590 мм, діаметром 1000 мм і товщиною стінки 5 мм (рис. 1.4).



1 - барабан; 2 – сталеві смуги; 3 – завантажувальний люк; 4 – кришка люка; 5 – кріплення дверцят; 6 – редуктор

Рис. 1.4 – Великий обертовий барабан закритого типу

До внутрішньої поверхні барабана приварені 3 сталеві пластини товщиною 5мм з висотою ребер 250 мм, які розташовані на однаковій відстані одна від одної. Барабан обертається зі швидкістю 25 об/хв. Зразок завантажують в барабан так, щоб його уламки падали внутрішньою поверхнею, а кришка люка щільно закривається; після 100 об/хв. Барабан зупиняється автоматично. Зразок вивантажується, а дрібні частинки ретельно збираються. Після випробування в барабані досліджуваний матеріал просівають за допомогою механічного сита або вручну. Відсоток механічної міцності (Р) розраховується за формулою:

$$П = \frac{m_1}{m} \cdot 100, \tag{1.1}$$

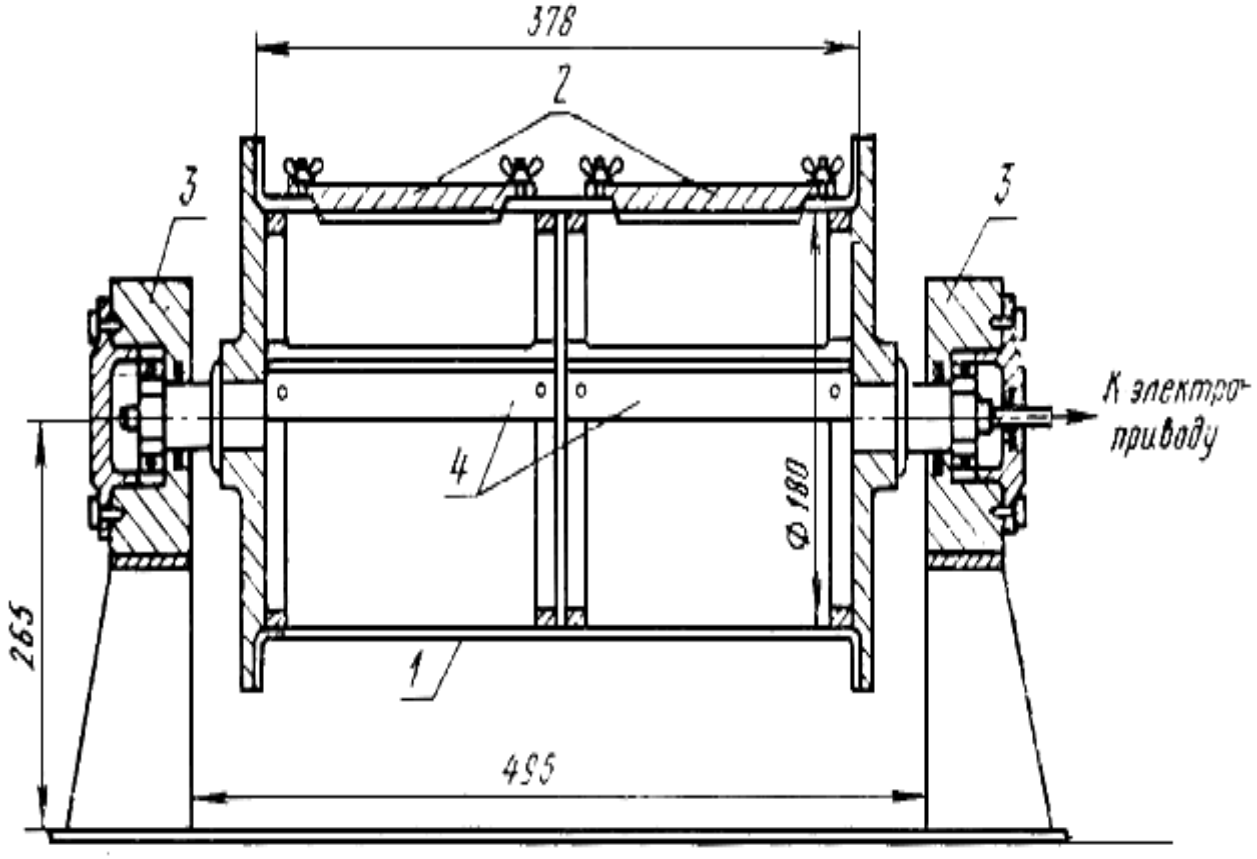
де m – загальна вага наважки, кг;

m_1 – вага надґратного продукту після тестування в барабані, кг.

Остаточний результат – це середньо арифметичне двох результатів визначень, якщо другий результат дослідження знаходиться в межах 10 % від результату першого дослідження. В іншому випадку проводиться третє оцінювання, і остаточний результат визначається як середнє арифметичне двох найближчих результатів оцінювання.

Для тесту на розмір 25-50 мм використовується малий подвійний барабан (рис. 1.5).

Діаметр і довжина кожного з циліндрів складає 180 мм. Усередині кожного з них маємо три смуги шириною 30 мм. Швидкість обертання становить 50 об/хв. Початковий зразок подрібнюють до залишку вагою не менше 10 кг. Кожен циліндр завантажують 1 кг досліджуваного вугілля; після 20 хвилин обертання барабана зразки окремо просівають через сито з отворами 25х25 мм.



1 – здвоєний барабан; 2 – сталеві смуги; 3 – редуктор; 4 – дверцята

Рис. 1.5 – Малий подвійний барабан

Сито струшують горизонтально в обох напрямках п'ять разів., що залишене на ситі вугілля, ретельно збирають, а потім зважують з точністю до 0,01 кг. Інші два зразки випробовуються таким же чином. Значення міцності розраховуються відповідно до залежності 1.1.

За остаточне значення механічної міцності приймають середнє арифметичне значення чотирьох результатів випробувань.

1.2.5. Визначення механічної міцності ТГК методом товчення

Визначення механічної міцності ТГК здійснюється також методом товчення за ГОСТ 21153.1-75 «Породи гірські. Метод визначення коефіцієнта міцності по Протод'яконову» [9]. Суть цього методу полягає у визначенні коефіцієнта міцності. Коефіцієнт міцності пропорційний відношенню між роботою, витраченою на руйнування породи, і поверхнею, утвореною при

руйнуванні. Вона оцінюється загальним обсягом часточок менше за розміром 0,5 мм.

Для визначення коефіцієнта міцності гірської породи за цим методом використовують прилад (рис. 1.6), що складається зі склянки 1 і вставленої в склянку трубчастої копули 2, в якій вільно розміщені тягарець 3 масою 2,4±0,01 кг і ручка 4, прив'язана до тягарця ниткою.

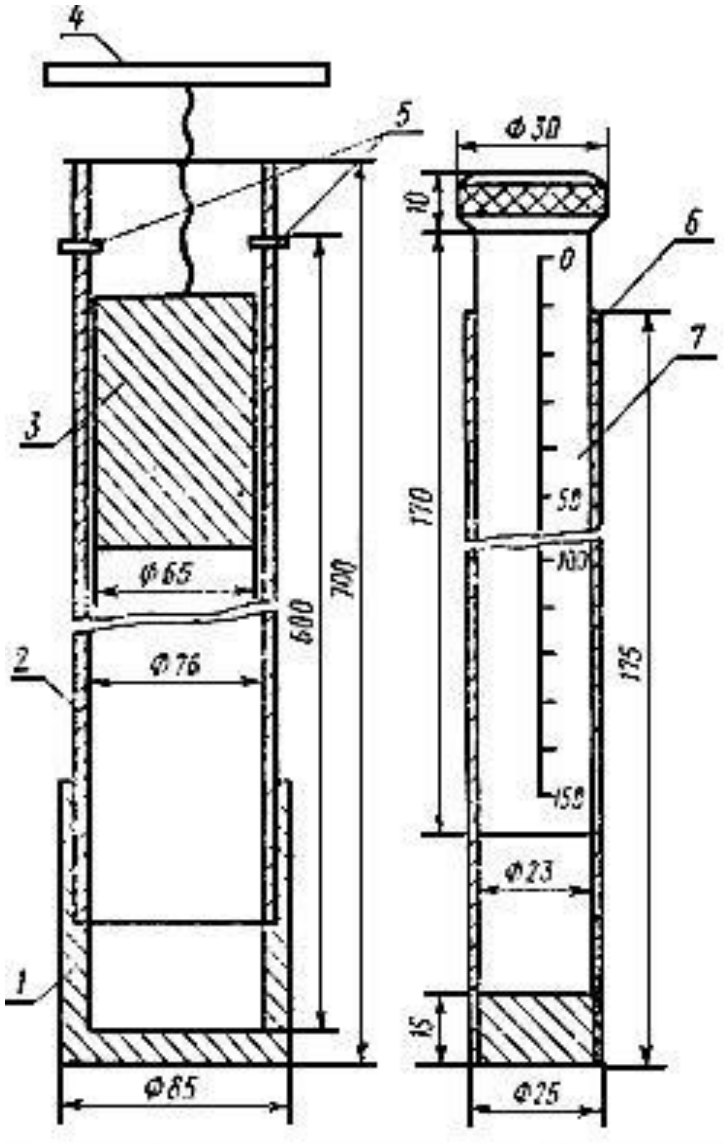


Рис. 1.6 – Прилад визначення міцності вугілля методом Протод'яконова

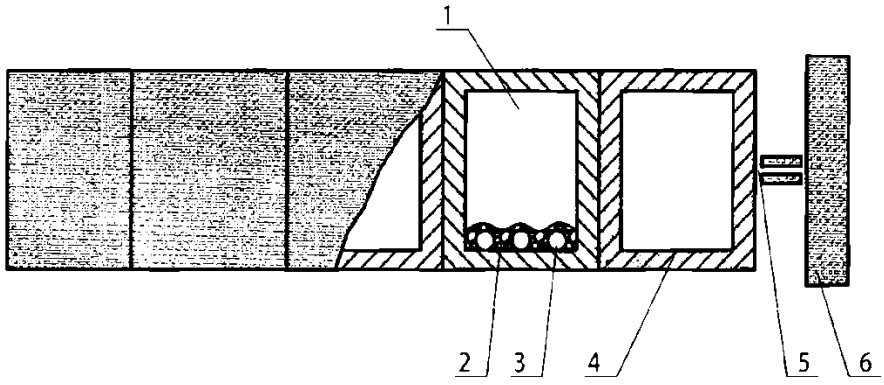
Трубчаста копула має у верхній частині отвір, в який вставляється штифт 5 для обмеження підйому вантажу. Комплекс приладу містить

об’ємний мірник, який включає стакан 6 і плунжер 7 з вимірювальною вздовшньою шкалою від 0 до 150 мм його осі.

В якості величини, що приблизно характеризує відносний опір гірських порід руйнуванню, М.М. Протод’яконов запропонував шкалу міцності, згідно з якою гірські породи поділяються на десять категорій з коефіцієнтами міцності *f* в межах від 20,0 до 0,3. Кам’яне вугілля і антрацити в основному належать до VI; VI, а; VII категорій, з *f* від 6 до 1. Цей метод доволі добре відображає міцнісні властивості вугільних пластів для порід різної міцності та середньої міцності, але має недоліки з точки зору коефіцієнтів міцності для дуже міцних порід.

1.2.6 Визначення механічної міцності вугілля методом ВІМС

Визначення механічної міцності вугілля методом ВІМС [15] полягає у вимірюванні ступеня подрібнення дуже малого зразка вугілля металевою кулькою в невеликій циліндричній камері, що обертається (рис. 1.7).



1 – камера; 2 – вугілля; 3 – кулі; 4 – стінка камери; 5 – вал; 6 – шків

Рис. 1.7 – Диспергометричний прилад для визначення механічної міцності вугілля за методом ВІМС

Пристрій складається з шести невеликих циліндричних металевих камер довжиною 50 мм і з внутрішнім діаметром 82 мм. У них поміщається наважка вугілля і шість сталевих кульок (d=19мм, вага – 108±1 г) в

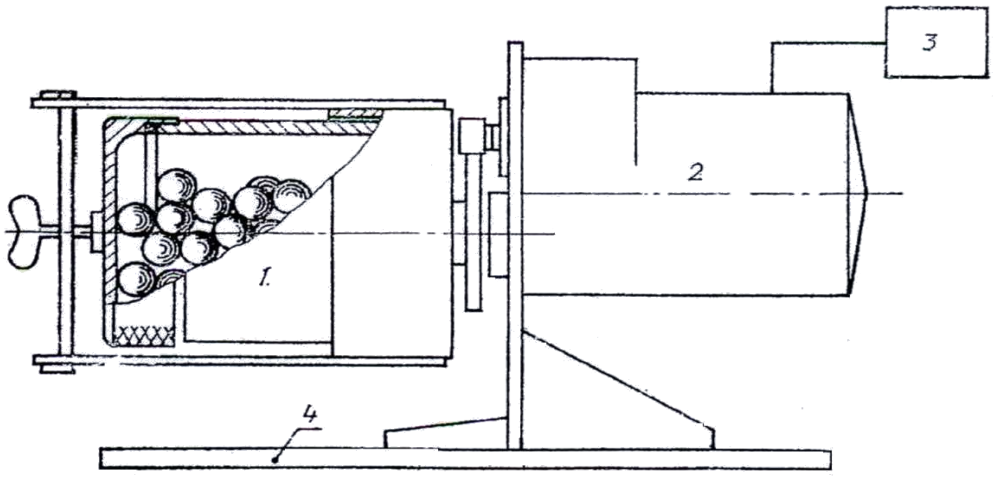
латунному циліндрі, встановленому на валу, що обертається на шарикопідшипниках. Камера обертається зі швидкістю 90 об/хв.

Перед завантаженням зразок вугілля подрібнюють до розміру частинок 5,1-4,0 мм і відбирають 20 см^3 об'єму. Досліджуване вугілля завантажується в камеру разом зі сталевими кульками (два паралельних експерименти). Після кількості обертів (500 або 250) обладнання зупиняють.

Подрібнений матеріал просівають і зважують отримані класи. Вихід кожного класу розраховується у відсотках від ваги всього подрібненого вугілля. Механічна міцність визначається виходом класів з розміром зерен, що перевищує 50 % їх початкового розміру. Для початкового розміру зерен від 5,1 до 4,0 мм це значення визначається залишком на ситі 2,46 мм; вміст класів менше 0,074 мм є показником утворення над дрібної фракції під час дроблення.

1.2.7 Метод визначення коефіцієнта розмолоздатності – ВТІ

Наразі є стандартизований метод визначення розмолоздатності – ВТІ (ГОСТ 15489.1-93 «Вугілля буре, кам'яне, антрацит і горючі сланці. Метод визначення коефіцієнта розмолоздатності за ВТІ»). Принципова схема відповідного обладнання представлена на рис. 1.8.



1 – барабан; 2 – мотор-редуктор; 3 – реле часу; 4 – підставка

Рис. 1.8 – Схема установки з визначення коефіцієнта розмолоздатності ВТІ:

Задля визначення коефіцієнта розмолоздатності ВТІ ($К_{ло}$) 500 г зразків повітряно-сухого матеріалу з розміром зерен 2,36-3,33 мм подають у стандартний лабораторний кульовий млин (внутрішній діаметр – 270 мм; довжина – 200 мм; швидкість обертання – 41,4 об/хв) і подрібнюють протягом τ = 15 хвилин. За цей час млин обертається зі швидкістю 621 об/хв. Подрібнений матеріал пропускають через сито з отворами 90 мкм і вимірюють масу залишку.

В якості еталону під час визначення коефіцієнта розмолоздатності за ВТІ приймається ТГК, для якого після дроблення в стандартних умовах залишок на ситі з розмірами комірок 90 мкм становитиме 69,2 % мас. (наприклад, антрацит донецького басейну).

Коефіцієнт подрібнюваності ВТІ ($К_{ло}$) визначається відношенням питомої поверхні досліджуваного до питомої поверхні еталонного вугілля:

Оскільки питома поверхня пропорційна величині $(\ln 100/R_{90})^{2/3}$, тому

$$К_{ло} = (ln100/R_{90})^{2/3}/(ln100/R_{90}^{ет})^{2/3}, \quad (1.2)$$

де R_{90} – загальний залишок випробуваного зразка на ситі 90 мкм, що виражається в процентах від маси наважки.

Враховуючи, що R_{90}^{em} = 69,2%, маємо

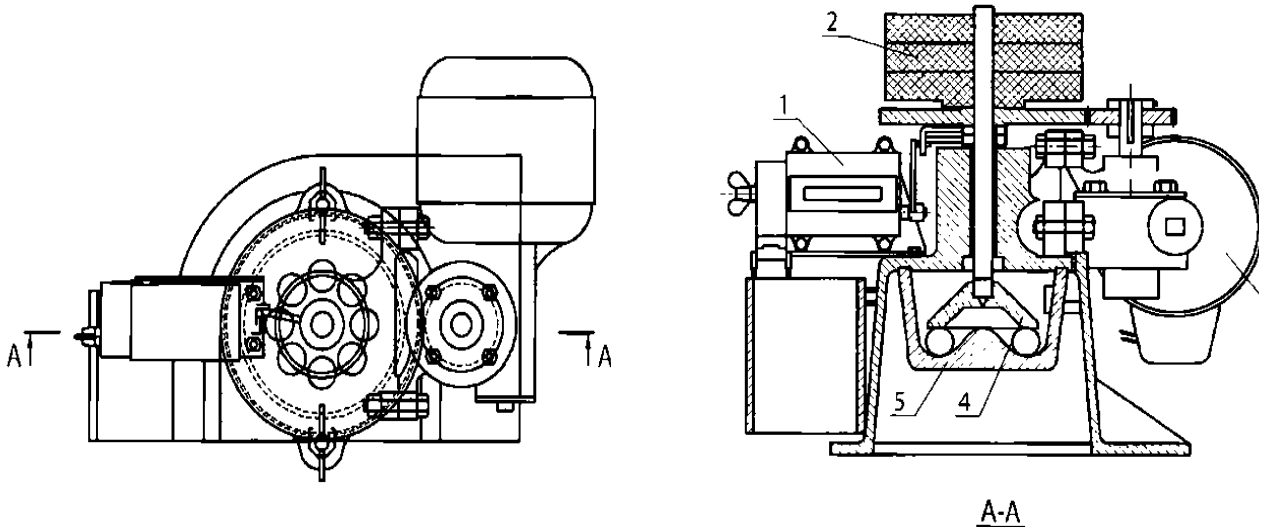
$$К_{ло} = 1{,}96(ln100/R_{90})^{2/3} \quad (1.3)$$

Коефіцієнт подрібнюваності досліджуваного палива також можна визначити за графіком тарування, підготовленим для установки перед випробуванням.

1.2.8 Визначення коефіцієнта розмолоздатності методом Хардгрова

Індекс подрібнюваності твердого вугілля *(HGI)* визначається на основі маси вугілля, що проходить через сито з отворами 0,075 мм (0,071 мм) після випробування за результатами 4-х стандартних зразків згідно ISO 5074:2015

[16-18]. Для проведення випробувань за даним методом використовується установка, зображена на рис. 1.9.



1 – тахометр; 2 – вантажі; 3 – редуктор; 4 – верхнє притискне кільце; 5 – розмельна чаша

Рис. 1.9 – Схема приладу з визначення коефіцієнта розмолоздатності методом Хардгрова:

Установка складається з нерухомої розмелювальної чаші зі загартованої сталі з горизонтальним кільцевим донним заглибленням, в якій вміщуються вісім низькоабразивних сталевих куль діаметром 25,40 мм. Кулі приводяться в рух верхнім притискним кільцем, зі швидкістю обертання (20±1) об/хв. Притискне кільце, своєю чергою, приводиться в дію від вертикального валу електродвигуном з редуктором або ремінною передачею в сучасніших моделях. На вертикальному валу розміщено додатковий вантаж, і загальна вертикальна сила на кулю, включаючи вагу вантажів, валу, верхнього притискного кільця і механізму передачі, становить (29,0±0,2) кг. Пристрій оснащений тахометром і автоматичним пристроєм, налаштованим на зупинку пристрою після 60±0,25 обертів валу.

Коефіцієнт Хардгрова визначають за калібрувальним графіком або розраховують за рівнянням калібрувальної прямої [19]. За остаточний результат випробування приймають середнє арифметичне значення результатів двох вимірювань округлене до найближчого цілого числа. Збіжність результатів визначення повинна бути не більше 2-х одиниць, а відтворюваність – не більше 3-х одиниць. Математичний аналіз паралельного визначення коефіцієнтів розмолоздатності методами Хардгрова і BTI вказує, на існуючий між ними нелінійний взаємозв'язок за залежністю *(1.2)* (рис. 1.10), з кореляцією 0,87 і залишковим відхиленням 5,6 одиниць.

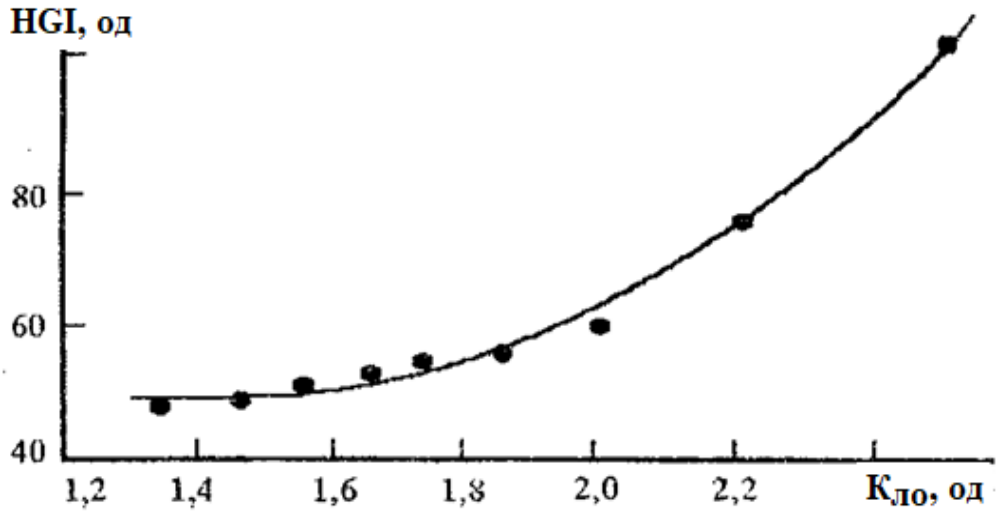


Рис.1.10 – Взаємозв'язок між коефіцієнтом розмолоздатності за Хардгровим (*HGI*) та *BTI* ($К_{ло}$)

Діапазон від вугілля твердішого до м'якішого типу відповідає значенням $К_{ло}$ від 0,77 до 2,5 та *HGI* від 30 до 146.

$$HGI = 140{,}7 - 126{,}4 \cdot К_{ло} + 43{,}9 \cdot К_{ло}^2 \qquad (1.4)$$

Залежність *(1.4)*, справедливе в діапазоні значень $К_{ло}$=1,3-2,5 од., і, за необхідності, дозволяє оцінювати коефіцієнт розмолоздатності за Хардгровом при відомих значеннях параметра $К_{ло}$.

У випадку необхідності вирішення зворотної задачі, тобто обчислення $К_{ло}$ в області 48-105 одиниць, використовують просте співвідношення:

$$К_{ло} = \frac{3HGI - 115}{HGI - 26} \quad (1.5)$$

Для перерахунку шкали *HGI* на величину *BTI* використовують формулу [30]:

$$К_{ло} = 0{,}32 + 0{,}0149 \cdot HGI, \quad (1.6)$$

Залежність між коефіцієнтом подрібнюваності, визначеним за методом *BTI* ($К_{ло}$) та Хардгрова (*HGI*), показана на рис. 1.11.

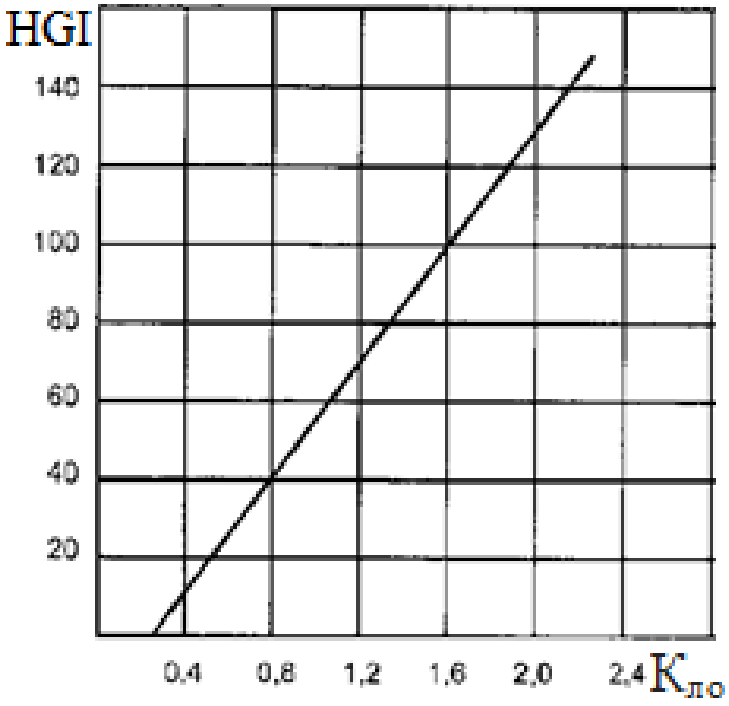


Рис. 1.11 – Взаємозв'язок між коефіцієнтами розмолоздатності визначеними за методами *BTI* ($К_{ло}$) та Хардгрова (*HGI*).

Коефіцієнти подрібнюваності, отримані в лабораторії для вугілля певного гранулометричного складу, повітряно-сухого стану, можуть бути перераховані для умов роботи палива, тобто загального вмісту вологи в робочому паливі та іншого гранулометричного складу.

Коефіцієнт розмолоздатності вугілля *HGI* є важливим параметром для надання технологічної оцінки відносної міцності різних марок вугілля та розуміння його поведінки під час дроблення. У той же час, метод має ряд недоліків, таких як складність підготовки зразків, наявність дорогого обладнання та тривалий час проведення випробувань. Зважаючи на ці проблеми, раніше були зроблені спроби кореляції між коефіцієнтом Хардгрова і між простим аналітичним складом відповідного вугілля [20-24] (див. розділ 1.2.10).

1.2.9 Метод визначення індексів Бонда

Для чіткого визначення бажаної продуктивності обладнання та якості продукції з метою зменшення капітальних витрат та забезпечення мінімально можливої собівартості переробки використовують метод Бонда [25]. За допомогою методу визначення індексу Бонда можна розрахувати подрібнюваність /крихкість/ абразивність мінеральної сировини. Такі розрахунки необхідні для визначення необхідного ступеня подрібнення кульового млина для даної сировини та його продуктивності.

Проведення дослідження.

Для імітації подрібнення замкнутого циклу в млині стрижневого або кульового типу необхідно не менше 15-20 кг сировини. Кульові і стрижневі млини по суті мають однакову конструкцію, що складається з подрібнювального барабана 12×12 дюймів з помольними кулями або барабана 12×24 дюйми зі стрижнями (рис. 1.12).

Подрібнення здійснюється в кульовому млині з довжиною барабана 305 мм, діаметром 305 мм, об'ємом 22,3 дм^3, завантаженому змішаними кулями діаметром 38, 25 і 19 мм вагою 6,7 кг кожного розміру, що обертаються зі швидкістю 70 об/хв.

Рис. 1.12 – Млин визначення індексу Бонда

Тож, загальна вага завантажених помольних куль становить близько 20-21 кг.

Коефіцієнт подрібнюваності в даному методі називається індексом продуктивності Бонда і розраховується за наступною формулою:

$$W_1 = 13{,}76/\Delta G^{0{,}82} \tag{1.7}$$

де $\Delta G = (\Delta G + \Delta G_{m-1})/(n_m + n_{m-1})$ – середня кількість матеріалу, менша за 74 мкм, що є отриманою за два останні цикли розмелювання і віднесена до одного обороту млинового барабана.

Таким чином, індекс роботи Бонда – кількість енергії, що необхідна для подрібнення однієї короткої тони (907 кг) матеріалу з нескінченно великими частинами розміру до вмісту 80 % класу <100 мкм (D100=80 %) в кульовому млині подрібнення мокрого типу з діаметром барабана 2,4 м. Для млинів сухого типу подрібнення значення W_1, розраховане за формулою *(1.7)* зростає на 30 %.

Тож, на основі отриманих результатів даного розрахунку можна доволі просто підібрати промислове необхідне обладнання, яке зможе найбільш ефективно подрібнювати в заданих умовах (тип подрібнюваного матеріалу, умови подрібнення і т. д.).

Метод Бонда широко використовується за кордоном для розрахунку дробарок і кульових млинів барабанного типу для подрібнення руд кольорових і чорних металів, вапняків, клінкеру тощо. Метод є доволі трудомістким – час одного аналізу перевищує вісім годин.

1.2.10 Статистичний індекс подрібнюваності вугілля (*SGI*)

Індекси подрібнюваності вугілля є важливими технологічними параметрами з метою оцінки відносної твердості вугілля різного типу та марок, а також для прогнозування його поведінки при подрібненні. Такі індекси, які називаються статистичними індексами подрібнюваності (*SGI*), корисні для оцінки не тільки поведінки вугілля при подрібненні, але і його здатності утворювати пил під час подрібнення [26-28].

Кореляція між *SGI* та даними технічного аналізу вугілля виглядає наступним чином [29].

$$\begin{aligned} SGI = {} & 93{,}25 + (0{,}256 \cdot W_t^r + 0{,}196 \cdot W_t^{r2}) \\ & + (3{,}291 \cdot A^d - 0{,}027 \cdot A^{d2}) - (3{,}495 \cdot V^d - 0{,}087 \cdot V^{d2}) \\ & - (5{,}515 \cdot FC^d - 0{,}083 \cdot FC^{d2}) \end{aligned} \qquad (1.8)$$

де W^r_t,, A^d, V^d *та* FC^d – масовий вміст (на сухий повітряний стан у відсотках) відповідно вологи, золи, летких речовин та зв’язаного карбону.

Наведена залежність дозволяє проаналізувати вплив кожного з зазначених чотирьох факторів тех. аналізу вугілля на його подрібнюваність. Отже, аналізуючи цю залежність, можна зробити висновок, що зі збільшенням вологості вугілля статистичний показник його подрібнюваності зростає. Однак збільшення *SGI* не є надто значним через те, що збільшення змісту вологи завжди пов’язане зі зростанням кількості та розмірів

функціональних груп, що містять кисень і є відповідальними за зшивання за рахунок водневих зв’язків.

Наступний фактор в залежності стосується зольності, який показує, що індекс *SGI* має тенденцію до зростання зі збільшенням вмісту золи у вугіллі. Таким чином, залежність принаймні підтверджує, факт пом’якшення матеріалу зі збільшенням вмісту мінеральних речовин.

Наступні два фактори – V^d і FC^d – мають негативний знак, що вказує на те, що вони мають тенденцію до зменшення значення *SGI*. Тож, враховуючи вплив летких компонентів, можна побачити, що міцність, виміряна за індексом *SGI,* зростає в діапазоні вмісту V^d від 20 до 40,2 %. Таку саму тенденцію можемо спостерігати і для значення FC^d в діапазоні 15-66 %.

ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 1

1. На основі здійсненого огляду найбільш поширених існуючих сучасних методів визначення показника – механічна міцність вугілля, можна зробити висновок, що він залежить від ряду факторів повну зміну котрих неможливо врахувати (в’язкість, тріщинуватість, крихкість, властивості структурних зв’язків, тощо).

2. Оскільки варіації міцності в основному обумовлені властивою вугіллю його природною неоднорідністю, його міцність повинна виражатися певним інтегральним показником, чисельний вираз якого неминуче буде коливатися навколо деякого середнього значення і міг би бути визначений лише наближено.

3. Методи механічних випробувань зразків гірських порід є переважно лабораторними і, порівняно з натурними методами, мають високу надійність і доступність зважаючи на свою розробленість.

4. Через те, що метод Хардгрова є найбільш поширеним методом оцінки механічної міцності вугілля, а також зважаючи на те, що показник *HGI* пов’язаний з основними показниками якості вугілля (вологість, зольність, ступінь метаморфізму, елементний, мінеральний і петрологічний склад, окиснення), з метою подальшої інтеграції вітчизняної науки зі світовою саме цей метод було б доцільно використовувати для визначення механічних властивостей вугілля. Метод стандартизований, є відносно простим в апаратурному оформленні і корелює з іншими показниками міцності вугілля і з потужністю, що споживається при його подрібненні дробильним обладнанням. Також можна використовувати інші методи, які корелюють з методом Хардгрова.

РОЗДІЛ 2
МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Використані методи вивчення складу та властивостей вугілля та вугільних шихт

Для характеристики складу та властивостей вугілля та вугільних шихт використовували стандартизовані методи.

2.2 Визначення коефіцієнта розмолоздатності по Хардгрову».

Дослідження щодо визначення коефіцієнта розмолоздатності проводилися згідно з ISO 5074:2015 «Кам’яне вугілля».

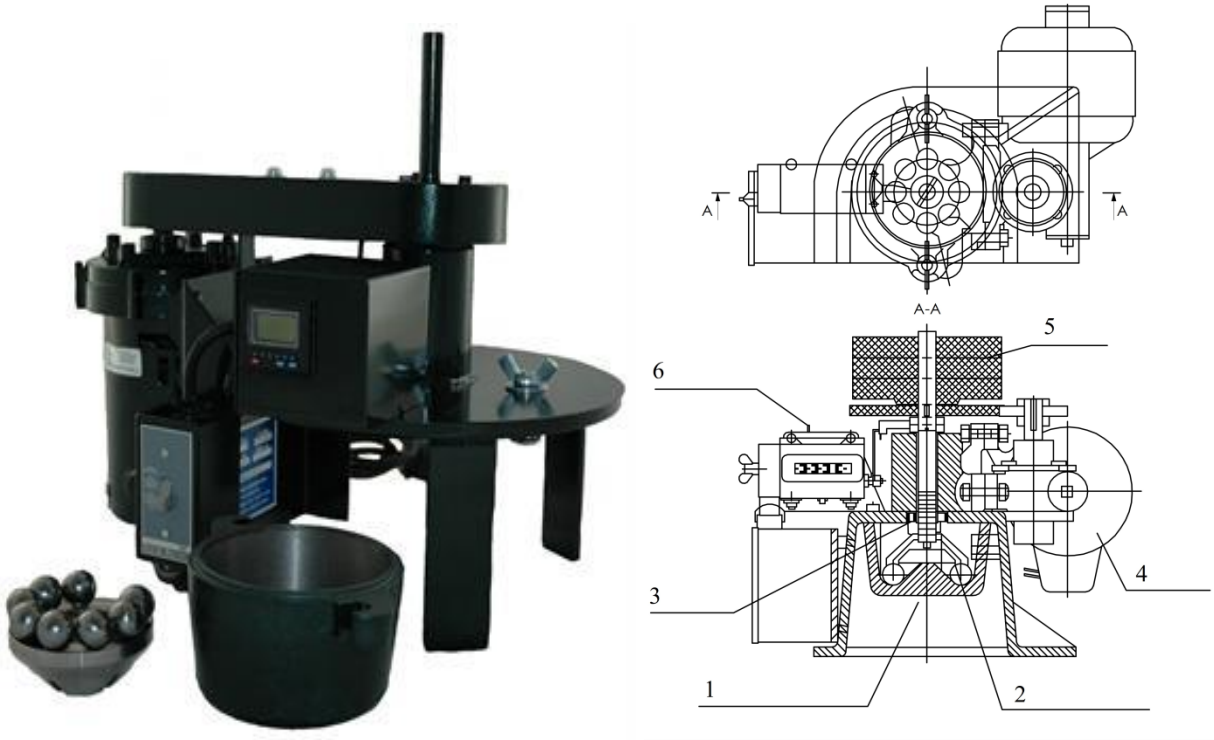
Кількісною характеристикою розмолоздатності палива є коефіцієнт розмолоздатності, який визначають шляхом порівняння результатів випробування дослідженого палива з результатами випробувань еталонного палива. Даний коефіцієнт дозволяє створити сукупне уявлення таких фізико-механічних властивостей вугілля, як міцність, твердість, тріщинуватість, пружність, та ін. Він насамперед залежить від стадії метаморфізму та петрологічного складу вугілля. Коефіцієнт розмолоздатності є безрозмірною величиною і виражений в умовних одиницях і є також відносною характеристикою вугілля, значення якої залежить від вибору умов визначення, тому умови визначення коефіцієнта розмолоздатності стандартизовані. Дослідження проводилися згідно з ГОСТ 15489.2-2018 ISO 5074:2015 «Кам'яне вугілля. Визначення коефіцієнта розмолоздатності по Хардгрову» [8].

Методика проведення випробувань полягає у наступному:

Підготовлену до випробувань повітряно-суху пробу твердого палива із заданою крупністю частинок розмелюють у градуйованому апараті Хардгрова в стандартних умовах, після чого проводять ситовий аналіз отриманого матеріалу.

Коефіцієнт розмолоздатності по Хардгрову *(HGI)* проби палива визначається на основі маси вугілля, що проходить через сито з комірками 0,075 мм (0,071 мм) після його випробування, розрахунковим шляхом за рівнянням градуювальної прямої, виведеного за результатами випробувань чотирьох стандартних зразків, або за допомогою градуювального графіка, побудованого на основі рівняння градуювальної прямої.

Для проведення випробування цим методом використовують апарат Хардгрова, що зображено на рисунку 2.1.



1 – подрібнювальна чаша ; 2 – натискне кільце; 3 – вал з ущільненням; 4 – електродвигун; 5 – навантаження; 6 – лічильник обертів

Рис. 2.1 – Апарат Хардгрова

Пристрій складається з нерухомої розмолольної чаші із загартованої сталі з горизонтальним кільцевим заглибленням на дні, яка містить вісім полірованих сталевих куль діаметром 25,40 мм. Кулі приводяться до руху верхнім притискним кільцем, що обертається зі швидкістю (20±1) об/хв.

Притискне кільце, своєю чергою, приводиться в рух вертикальним валом через електродвигун з редуктором або, в сучасніших моделях, ремінну передачу. До вертикального валу прикріплений додатковий вантаж і, таким чином, загальна вертикальна сила на кульки, включаючи вагу вантажу, валу, верхнього притискного кільця і механізму передачі, має становити (29,0±0,2) кг. Пристрій оснащений лічильником обертів і автоматичним пристроєм, налаштованим на зупинку пристрою після 60±0,25 обертів валу.

Частини розмелюючого вузла градуйованого апарату Хардгрова, в який входять розмельна чаша, сталеві кульки і верхнє натискне кільце, ретельно очищають. Кульки поміщають у кільцеве заглиблення розмельної чаші, розташовуючи їх за можливістю, на рівній відстані одна від одної.

Далі від заздалегідь підготовленої згідно з методикою порції проби для випробування з розміром частинок від 1,18 мм (1,25 мм) до 0,60 мм (0,63 мм) відбирають наважку масою (50±01) г. Наважку рівномірно розподіляють у кільцевому заглибленні розмельної чаші та розрівнюють.

У розмельну чашу опускають верхнє натискне кільце, з'єднують його з вертикальним валом. На верхню частину валу накладають вантаж, маса якого розрахована з урахуванням того, щоб загальне навантаження на кульки складало (29,0±0,2) кг. Перевіряють рівномірність застосування навантаження. Налаштовують лічильник оборотів і регулюють автоматичний відключаючий пристрій так, щоб обертання валу припинялося через 60 ±0,25 обертів.

Включають двигун апарату Хардгрова. Після автоматичної зупинки обертання валу двигун відключають від джерела живлення і розбирають приводний вузол. Виймають розмельну чашу, знімають верхнє натискне кільце і переносять вугілля разом з кульками з чаші в запобіжне сито, вставлене в сито з отворами 0,075 мм (0,071 мм), під яким знаходиться піддон, що щільно прилягає. Вугільний пил, що налип до чаші, кільця і кульок, обережно змітають щіткою в те ж запобіжне сито. Після видалення кульок із запобіжного сита зчищають (включаючи його нижню поверхню) за

допомогою щітки прилиплі частинки вугілля в сито з отворами 0,075 мм. Замінюють запобіжне сито на кришку, що щільно прилягає, і переносять комплект, що складається з сита, верхньої кришки і піддона, в машину для механічного розсіву (ситан).

Розсів продовжують протягом 10 хв±10 с., після чого вугільний пил з нижньої поверхні сита з отворами 0,075 мм обережно зчищають у піддон за допомогою м'якої щітки, щоб не пошкодити сітку. Розсівання вугілля та очищення нижньої поверхні сита повторюють двічі, при цьому тривалість повторних розсівань становить 5 хв±10 с.

Далі зважують на вагах з ціною розподілу шкали 0,01 г вугілля, що залишилося на ситі з отворами 0,075 мм (0,071 мм) – (m_2), і вугілля, що пройшло через сито (в піддоні) – (m_3). Якщо сума цих мас (m_2+m_3) відрізняється від маси навішування, відібраної для випробування – (m) більш ніж на 0,5 г, випробування повторюють з новою наважкою вугілля.

Масу вугілля, що пройшло через сито з розміром отворів 0,075 мм, m, виражену в грамах, обчислюють за формулою:

$$m_1 = m - m_2 \tag{2.1}$$

де *m,* - маса наважки, відібраної для випробування, г:

m_2 -маса вугілля, що залишилося на ситі з отворами 0,075 мм (0,071мм), г.

Коефіцієнт розмолоздатності *(HGI)* визначається за калібрувальним графіком або розраховується за рівнянням калібрувальної прямої.

Остаточний результат випробувань розраховуються як середнє арифметичне визначення двох результатів коефіцієнта розмолоздатності Хардгрова (HGI) округлене до цілого числа.

2.3 Визначення коефіцієнта механічної міцності методом товчення Протод'яконова

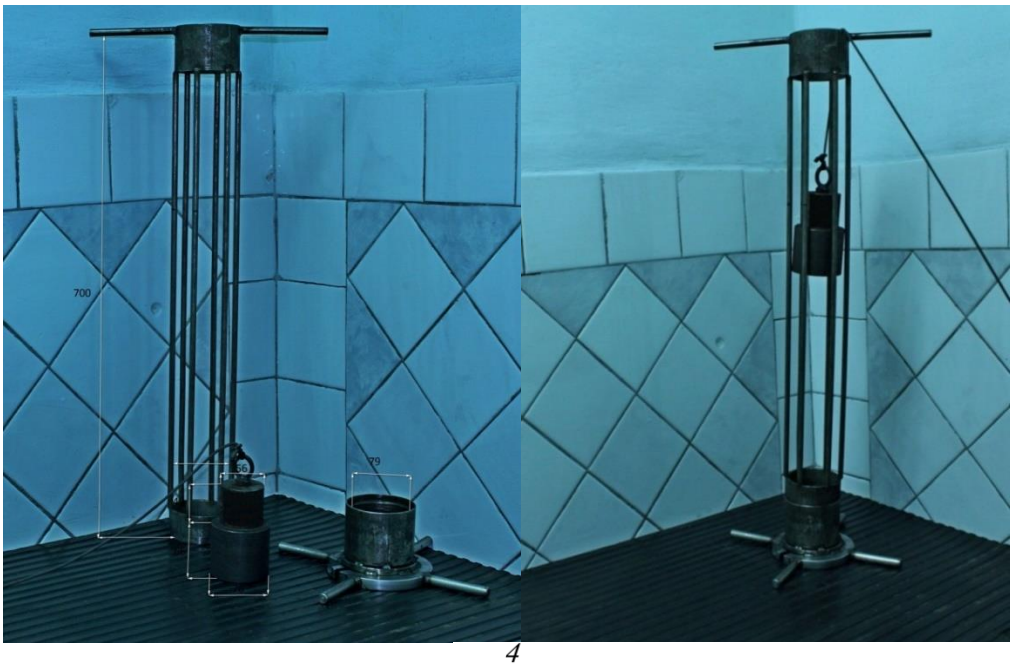
Визначення коефіцієнта механічної міцності методом товчення Протод'яконова відбувається за ГОСТ 21153.1-75 «Породи гірські. Метод визначення коефіцієнта міцності по Протод'яконову» [9].

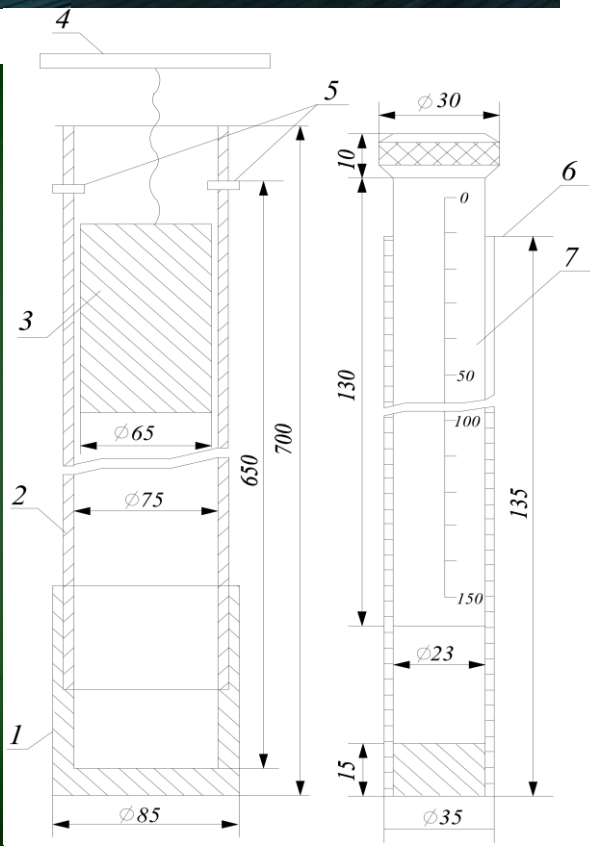
Метод визначення коефіцієнта міцності за Протод`яконовим поширюється на тверді гірські породи та встановлює коефіцієнт їхньої міцності за Протод`яконовим для класифікації порід за цим показником та використання його в технічній документації при розрахунках та проектуванні гірничих робіт, гірничого обладнання, а також під час проведення науково-дослідних робіт.

Суть цього методу полягає у визначенні коефіцієнту міцності, пропорційного роботі, витраченої на дроблення гірської породи, а також при дробленні новоутвореної поверхні, що оцінюється загальним об'ємом часточок розміром менше 0,5 мм.

Дослідження за методом Протод'яконова полягає в подрібненні зразка вугілля за допомогою падаючого вантажу, скинутого з певної висоти, і подальшому вимірюванні гранулометричного складу подрібненого вугілля. Руйнування вугільних зерен під дією падаючого вантажу найбільш близьке до процесу, що відбувається в молоткових дробарках, які також використовують ударну дію (удар молотків по вугіллю і броньованій плиті), а ситовий склад подрібненого зразка близький до промислових значень. Випробовуванню має піддаватися проба у повітряно-сухому стані зі вмістом вологи не більше 2 %, підвищення вологи призводить до злипання частинок і спотворення показника подрібнюваст.

Прилад для визначення коефіцієнту міцності, що представлено на рис. 2.2, складається зі стакану 1, вставленого в неї трубчастого копра 2, усередині якого вільно розташована гиря 3 масою 2,4±0,01 кг з ручкою 4, що прив'язана шнуром до гирі. Трубчастий копер у верхній частині має отвори, в які вставляють штифти 5, що обмежують підйом гирі.





1 – стакан; 2 – трубчастий копр; 3 – гиря;

4 – ручка; 5 – штифти; 6 – склянка; 7 – плунжер зі шкалою

Рис. 2.2 – Апарат Протод`яконова

У комплект приладу входить об’ємомір, що складається зі склянки 6 і плунжера 7 зі шкалою вимірювань в діапазоні показань від 0 до 150 мм повздовж його осі.

Відібрану пробу гірської породи (вугілля) розколюють молотком на твердій основі до одержання частинок розміром 20-40 мм. З подрібненого матеріалу зразка відбирають двадцять наважок масою 40-60 г кожна.

Кількість скидань гирі на кожну наважку встановлюється після дроблення перших п’яти наважок.

Кожну наважку окремо дроблять у склянці гирею, що падає з висоти 60 см. Кількість скидань гирі приймають залежно від очікуваної міцності породи (вугілля), зазвичай від п’яти до п’ятнадцяти скидань на кожну наважку.

Правильність вибраного режиму випробування контролюють після просіювання перших п’яти роздроблених наважок на ситі до припинення виділення підґратного продукту та виміру його обсягу в об’ємомірі. При отриманні стовпчика вугілля висотою від 20 до 100 мм за шкалою плунжера кількість скидань на кожну наважку для решти п’ятнадцяти наважок зберігають. При меншій або більшій висоті стовпчика вугілля в об’ємомірі кількість скидань коригують відповідно у більшу або меншу сторону.

П'ятнадцять наважок, що залишилися, дроблять у приладі послідовно у встановленому режимі випробування: при постійній кількості скидань гирі та висоті підйому гирі 60 см.

Після дроблення кожних п’яти наважок їх просіюють на ситі, підґратний продукт сита зсипають в об'ємомір, заміряють плунжером висоту стовпчика вугілля та записують її.

Коефіцієнт твердості гірської породи *(f)* розраховується за формулою (2.2):

$$f = \frac{20 \cdot n}{h}, \tag{2.2}$$

де 20 – емпіричний числовий коефіцієнт, що забезпечує загальноприйняті значення коефіцієнту міцності та враховує роботу, витрачену на дроблення;

n – кількість скидань гирі при випробуванні одного зразка;

h – висота стовпчика вугілля в об'ємом після випробування п'яти зразків, мм.

За кінцевий результат тесту приймається середнє арифметичне отриманих значень.

Цей метод доволі добре відображає властивості міцності для порід різної формації вугільної стійкості, помірно міцних порід, але має недоліки з точки зору коефіцієнтів міцності для дуже міцних порід.

2.4 Визначення спікливості та спікливої здатності вугілля і вугільних шихт засноване на визначенні міцності спеку вугілля (шихти) на зріз з антрацитом, що додається в вугілля в різних співвідношеннях.

Одним з найбільш інформативних методів визначення спікливості та спікливої здатності вугілля та шихт є метод, розроблений в інституті ДП «УХІН» [41-43].

Показником спікливості вугілля за цим методом є оцінка міцності кускового залишку, що спікся. Оскільки процес спікання завершується утворенням напівкоксу в інтервалі температур 500-600 °С, то саме міцність напівкоксу є об’єктивною характеристикою спікання вугілля та шихт.

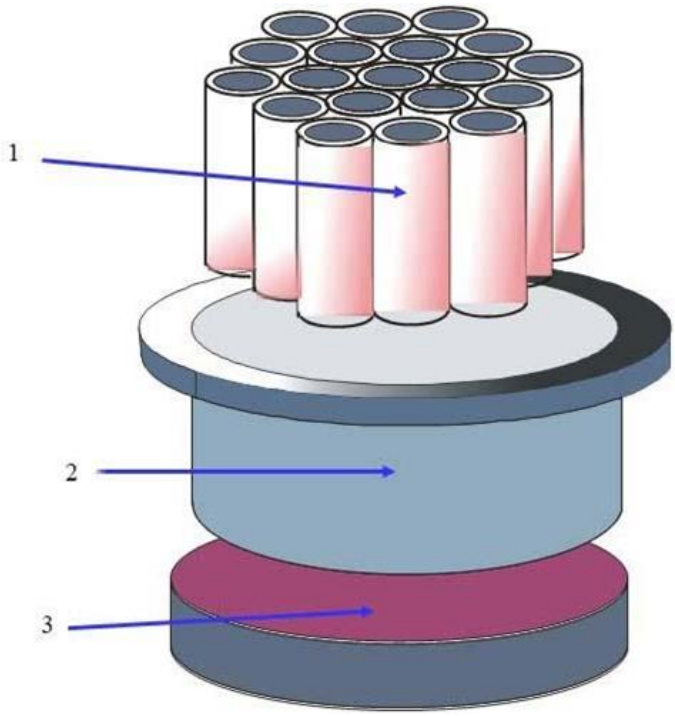
Мірою спікливої здатності є міцність контакту матриці напівкоксу з наповнювачем.

Показники спікливості і спікливої здатності вугілля і шихт обчислюються за кривою динаміки зміни міцності композицій, що спіклися, вугілля та/або шихт з еталонним наповнювачем (антрацитом), взятих у різних співвідношеннях.

У загальному вигляді можна говорити про визначення характеристик міцності ряду вуглець-вуглецевих композицій «зв’язуюче-наповнювач». В такому разі визначення спікливості вугілля є окремим випадком. Як нам

здається, цілком правомірно використання розробленого методу для визначення характеристик міцності спікливості і спікливої здатності будь-яких інших вуглець-вуглецевих композицій. При цьому у разі використання еталонного наповнювача можна оцінювати якість зв'язуючого, а при використанні еталонного зв'язуючого активність наповнювача.

Сутність способу полягає в наступному: в комірки керамічної касети 1, що зображена на рис. 2.3, попередньо зафіксованої у спеціальній камері коксування 2, завантажують проби суміші кам'яновугільного пеку з інертними наповнювачами з різними масовими співвідношеннями «наповнювач-пек» у діапазоні від 3:1 до 15:1.



1 – касета керамічних комірок; 2 – камера коксування зразків; 3 – нагрівач

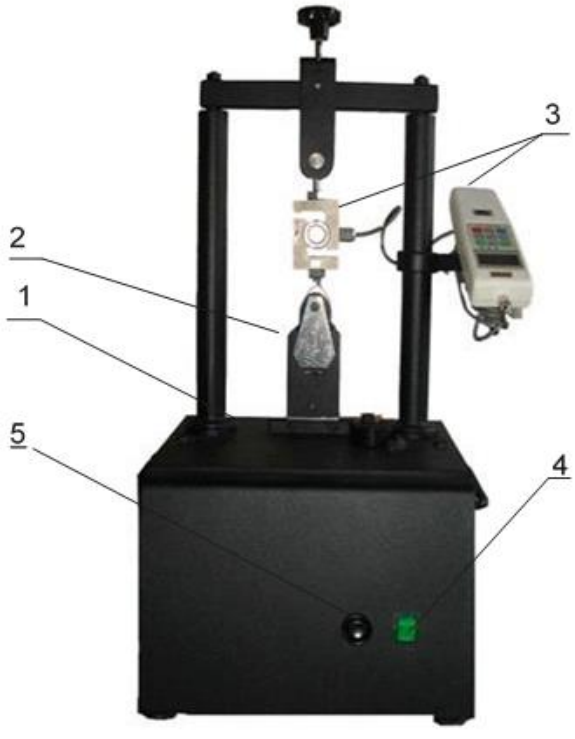
Рис. 2.3 – Камера коксування зразків пекових композитів

Це співвідношення було експериментально визначено у процесі адаптації методу до значень спікливих характеристик пеків [44, 45]. Для

різних наповнювачів у пекових композитів діапазон співвідношень може змінюватися.

Перед завантаженням проби пеку з наповнювачем зволожують і ущільнюють до густини 1,0 г/см^3. Завантажену камеру коксування засипають інертним матеріалом і закривають кришкою. Через канал у кришці вводять термопару в центральну комірку касети, після чого камеру коксування встановлюють у спеціальну електропіч. Наважку нагрівають до 550 ºС зі швидкістю нагрівання 10 ºС/хв., потім проводять ізотермічне вимірювання постійної кінцевої температури протягом 30 хв.

Піч охолоджують до кімнатної температури й витягують касету. Отримані циліндричні зразки напівкоксу пекових композитів випробовують на міцність у спеціальному пристрої (рис. 2.4) з цифровим динамометром.



1 – регулювальний гвинт; 2 – випробувальна комірка; 3 – цифровий динамометр; 4 – кнопка «Напруження»; 5 – кнопка «Пуск»

Рис. 2.4 – Пристрій для випробувань механічної міцності

Кожен зразок розміщують у гніздо випробувальної комірки (рис. 2.5) так, щоб знизу (з боку нагрівальної поверхні) кінець зразка не виступав за зворотну сторону випробувальної комірки.

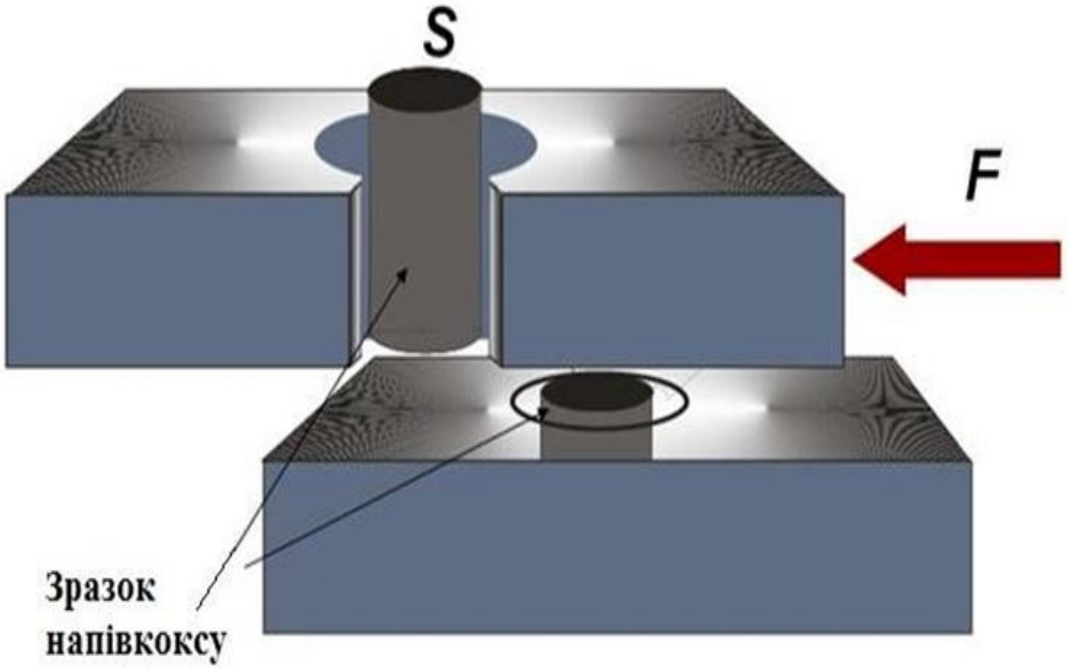


Рис. 2.5 – Випробувальна комірка: F – сила; S – перетин зразка

Область руйнування всіх зразків при цьому знаходиться на тій же відстані від нагрівальної поверхні, як і спай реєструвальної термопари. Таким чином, всі зразки в області руйнування мають однакову кінцеву температуру. Руйнування королька напівкоксу, що спікся, відбувається в досить тонкому шарі зразка.

Використовують одностороннє нагрівання циліндричного завантаження, при якому отримують зразок напівкоксу, з градієнтом температур за висотою [80]. Отже, визначення спікливості пеку за міцністю спеченого зразка можна проводити в ізотермічному шарі.

В роботі [80] показано, що при радіальному нагріванні неоднорідність зразка вище, бо зовнішні шари зразка, що спікся, проходили термообробку

триваліший час, ніж у центральній частині. Для збільшення товщини ізотермічного шару, а отже, однорідності пекової матриці в шарі, що згодом піддається механічному випробуванню, використовували ізотермічне витримування за кінцевої температури підготовки зразку.

За кінцевий результат випробування приймають середнє арифметичне двох паралельних визначень показників міцності на зрушення $\boldsymbol{\sigma}_{\text{зруш}}$ циліндричних зразків композитного напівкоксу.

На підставі отриманих даних встановлюють залежність механічної міцності зразків композитного напівкоксу від масового співвідношення наповнювач-пек у початкових пробах.

ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 2

1. Охарактеризовано необхідний і достатній набір інструментальних, переважно, стандартизованих методів дослідження складу і властивостей вугілля та вугільних шихт.

2. Розглянуті основні методи оцінки властивостей вугілля та його сумішей, використані в роботі, зокрема, визначення коефіцієнта розмолоздатності по Хардгрову згідно з ISO 5074:2015; визначення коефіцієнта механічної міцності методом Протод'яконова за ГОСТ 21153.1-75 та визначення спікливості та спікливої здатності вугілля і вугільних шихт методом ДП «УХІН».

РОЗДІЛ 3
ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ОСНОВНИХ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ВУГІЛЛЯ НА ПОКАЗНИКИ ЙОГО МЕХАНІЧНОЇ МІЦНОСТІ

Рівень і спосіб подрібнення вугілля має значний вплив на крупність міцність і коксу, продуктивність роботи коксової печі, витрати щодо підготовки вугілля, умов експлуатації вуглепідготовчих та коксових цехів. Однак, в умовах постійної зміни складу постачальників вугільної сировини, а також марочного і компонентного складів вугільних шихт необхідне проведення комплексних досліджень, результатом яких стали б конкретні технічні рішення, спрямовані на коригування роботи дробильного відділення в залежності від властивостей вихідної сировини, які б дозволили стабілізувати, в першу чергу, гранулометричний склад вугільної шихти на коксування, а також знизити витрату електроенергії на її підготовку. На більшості теплових електростанцій вугілля також спалюється у пилоподібному вигляді. Приготування вугільного пилу відбувається в кілька етапів, але найбільш складним і енергоємним є подрібнення палива.

В той же час зайве переподрібнення вугілля призводить самоопіснення спікливого вугілля, що своєю чергою негативно впливає на показники якості отримуваного коксу, інтенсивне дроблення також може призвести переважно до звуження пор при одночасному відкритті нової системи пор, в результаті чого молекули газу недоступні в області поверхні пор [46].

Але поточне розуміння механізму подрібнення не має бути зосереджено лише на його впливі на тонкість продукту та розподілі за розміром часточок, нехтуючи аспектом витраченої енергії та фізико-хімічним середовищем. Тож для проектування та експлуатації розмельного обладнання необхідно знати міцнісні властивості палива, основною з яких є подрібнюваність, що відображає стійкість палива до подрібнення в процесі підготовки пилу. Коефіцієнт розмолоздатності є одним з основних показників палива при розрахунку пилопідготовчих установок, а також для

оцінки продуктивності млинів та питомої витрати електроенергії на розмелювання вугілля. Показник розмолоздатності служить з метою оцінки продуктивності дробильних пристроїв при подрібненні в них твердого палива [47].

Задля встановлення науково-обґрунтованих кореляційних залежностей прогнозування розмолоздатності вугілля на основі визначення показників їх якості, необхідно встановити вплив основних показників якості вугілля на показники його механічної міцності. Подібні залежності дозволили б успішно використовувати їх для оптимізації роботи подрібнюючих відділень цехів вуглепідготовки, що входять у склад коксохімічних та металургійних підприємств, зокрема коректно налаштовувати подрібнююче обладнання з метою недопущення передроблення спікливої основи вугілля, а також з високою точністю оцінювати ступінь його впливу на витрати електроенергії.

3.1 Вплив основних показників якості вугілля на коефіцієнт його розмолоздатності за методом Хардгрова.

В роботі [48] показано, що задля оцінки механічних властивостей вугілля найкраще використовувати метод оцінки їх розмолоздатності по Хардгрову (ISO 5074:2015). Цей метод стандартизований, його апаратурне оформлення є відносно простим, і він добре корелює з іншими показниками механічної стійкості та потужністю подрібнювального обладнання, що використовується для дроблення вугілля.

Встановлено, що показник *HGI* пов’язаний з багатьма показниками якості вугілля, а саме: вологістю, зольністю, ступенем метаморфізму, вираженою показником відображення вітриніту або виходом летких речовин, елементним, петрографічним та мінеральним складами, окисненням. Проте ступінь залежності і навіть її спрямованість залежить від використовуваної під час аналізу вибірки вугілля.

Виходячи з цього, доцільно провести комплексні дослідження щодо оцінки впливу різних показників структури, складу і властивостей вугілля на

показник його розмолоздатності з розробкою науково-обґрунтованих кореляційних залежностей.

Було досліджено 75 проб вугілля різного типу (Україна, США, Канада, Австралія, Чехія, Польща, Індонезія), що входить до сировинної бази коксохімічних підприємств України.

У табл. 3.1–3.3 наведено максимальні, мінімальні та середні значення показників технологічних властивостей, петрографічних характеристик, елементного складу та структурних параметрів досліджених проб вугілля.

Таблиця 3.1

Технологічні властивості досліджених проб вугілля

Значення	Технічний аналіз, %			Температура займання неокисненого вугілля,°С	Коефіцієнт розмолоздатності по Хардгрову, од.
	A^d	S^d_t	V^{daf}	$t_{зв}$	*HGI*
Максимальне	11,5	2,38	41,3	410,6	85
Мінімальне	4,5	0,29	17,7	352,5	43
Середнє	8,1	0,84	31,2	380,4	65

Таблиця 3.2

Петрографічна характеристика досліджених проб вугілля

Значення	Середній показник відбиття вітриніту, %	Петрографічний склад (без урахування мінеральних домішок), %				
	R_o	*Vt*	*Sv*	*I*	*L*	*ΣOK*
Максимальне	1,56	98	3	55	11	57
Мінімальне	0,64	42	0	1	0	1
Середнє	1,00	74,4	0,6	22,6	2,5	23,2

Таблиця 3.3

Елементний склад та структурні параметри досліджених проб вугілля

Значення	Елементний склад, %					Структурні параметри	
	C^{daf}	H^{daf}	N^{daf}	S^{d}_{t}	$O_d{}^{daf}$	δ	C_{ap}, %
Максимальне	91,56	6,50	2,64	2,38	9,90	36,88	10,51
Мінімальне	81,91	4,64	1,23	0,29	1,42	15,39	7,41
Середнє	86,33	5,45	1,84	0,84	5,53	22,23	9,07

Аналізуючи наведені в таблицях значення, можна відзначити, що показники дослідженої вибірки характеризуються широким діапазоном даних. Так показник виходу летких речовин V^{daf} коливається від 17,7 до 41,3 %; середній показник відбиття вітриніту – від 0,64 до 1,56 %; а вміст фюзенізованих компонентів – від 1 до 57 %.

Структурні параметри розраховували за формулами, наведеними у роботах [83–85].

Зокрема, вміст ароматичного вуглецю розраховували за залежністю (3.1), а ступінь ненасиченості органічної маси за залежністю (3.2):

$$C_{\text{ap}} = C^{daf} \cdot (\frac{340}{100-\text{C}^{daf}})/100, \tag{3.1}$$

$$\delta = \frac{\text{C}^{daf}}{6} - \text{H}^{daf} + N^{daf}/14, \tag{3.2}$$

де C_{ap} – вміст карбону загального;

C^{daf} – вміст карбону на сухий беззольний стан, %;

δ – ступінь ненасиченості структури вуглецю;

H^{daf} – вміст гідрогену на сухий беззольний стан, %;

N^{daf} – вміст нітрогену на сухий беззольний стан, %.

Крім того, у дослідженому вугіллі згідно ДСТУ 7411-2014 визначали температуру його займання, внаслідок тісної залежності цього параметра з показниками складу, будови та властивостей [49–48].

Для досліджуваної вибірки були розраховані коефіцієнти парної кореляції між показниками характеристик вугілля та величиною *HGI* (табл. 3.4).

Значимість коефіцієнтів кореляції r перевіряли порівнянням абсолютної величини добутку $|r|\sqrt{n-1}|$ (де r – вибірковий коефіцієнт кореляції; n – обсяг вибірки (число статистичних спостережень)) з його критичним значенням H при заданій надійності висновку P. Критичне значення H за ймовірності P=0,999 для 75 проб становить 3,198.

У табл. 3.4 показані значення коефіцієнтів кореляції r та добутку $|r|\sqrt{n-1}$ для кожного вивченого взаємозв'язку:

Таблиця 3.4

Коефіцієнти парної кореляції і значення $|r|\sqrt{(n-1)}$ досліджених взаємозв'язків

Показник	R_o	V^{daf}	C^{daf}	O_d^{daf}	δ	C_{ap}	$t_{зв}$
r	0,873	-0,876	0,888	-0,854	0,868	0,866	0,874
$\|r\|\sqrt{n-1}$	7,354	7,377	7,479	7,199	7,315	7,294	7,364

Як видно з наведених у табл. 3.4 даних між коефіцієнтом розмолоздатності по Хардгрову та показниками R_0, V^{daf}, C^{daf}, O_d^{daf}, δ, C_{ap}, $t_{зв}$, що характеризують склад, будову та властивості ОМВ, встановлені значення коефіцієнтів кореляції, що перевищують 0,8. Для цих взаємозв'язків також характерні максимальні значення добутку $|r|\sqrt{n-1}$, що характеризує їхню високу надійність.

На рис. 3.1–3.7 наведено графічні залежності коефіцієнта розмолоздатності по Хардгрову від основних показників властивостей вугілля.

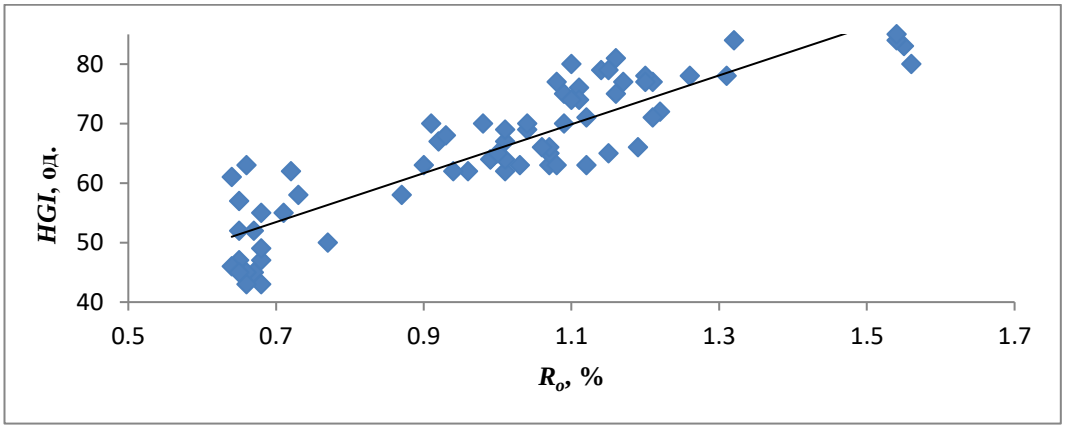


Рис. 3.1 – Графік залежності коефіцієнта розмолоздатності по Хардгрову *HGI* від середнього показника відбиття вітриніту R_0

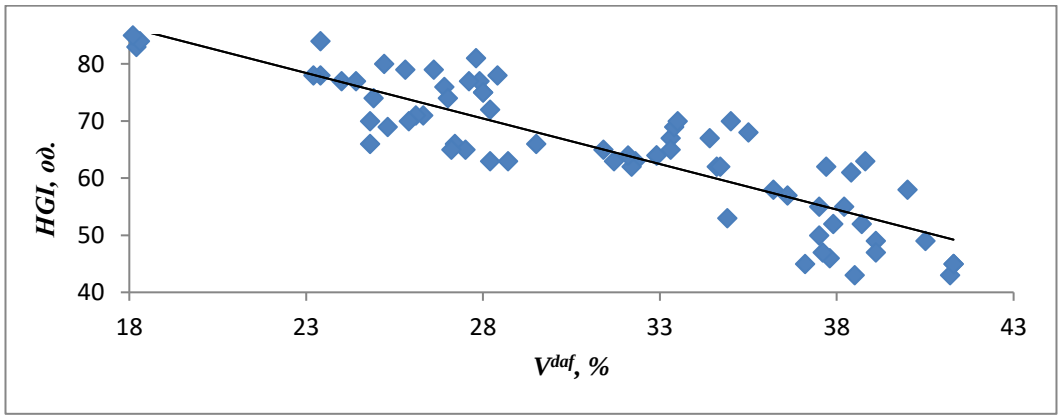


Рис. 3.2 – Графік залежності коефіцієнта розмолоздатності по Хардгрову *HGI* від вмісту летких речовин V^{daf}

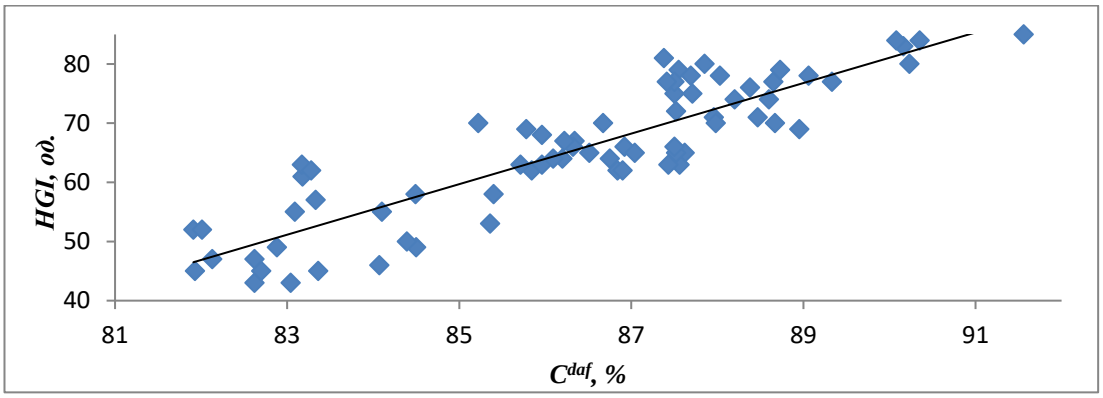


Рис. 3.3 – Графік залежності коефіцієнта розмолоздатності по Хардгрову *HG*I від вмісту загального вуглецю C^{daf}

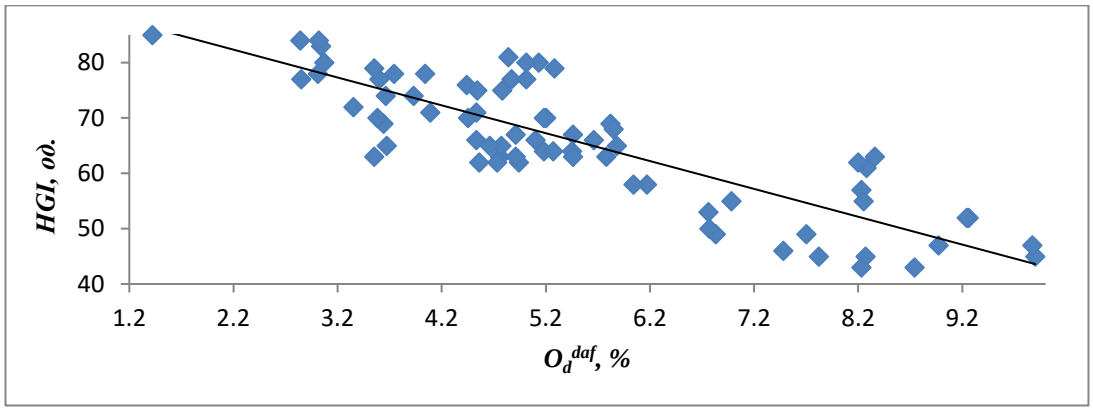


Рис. 3.4 – Графік залежності коефіцієнта розмолоздатності по Хардгрову *HGI* від вмісту кисню O_d^{daf}

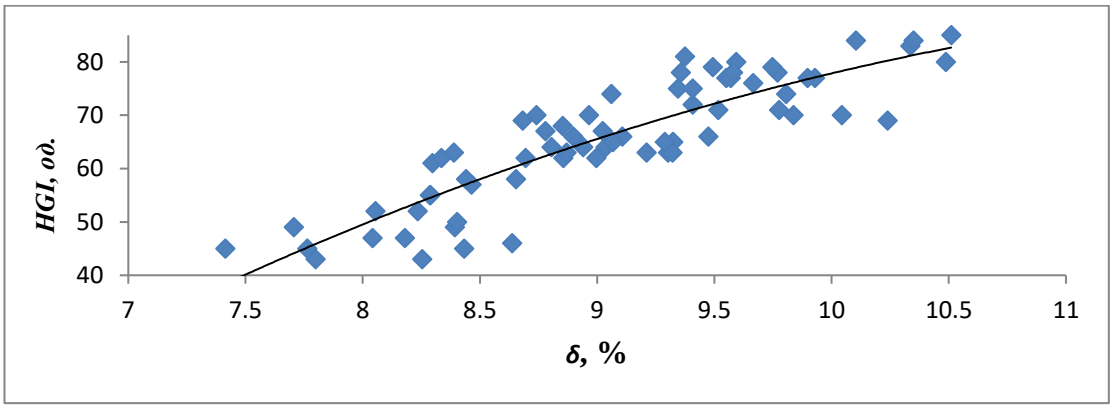


Рис. 3.5 – Графік залежності коефіцієнта розмолоздатності по Хардгрову *HGI* від ступіня ненасиченості органічної маси δ

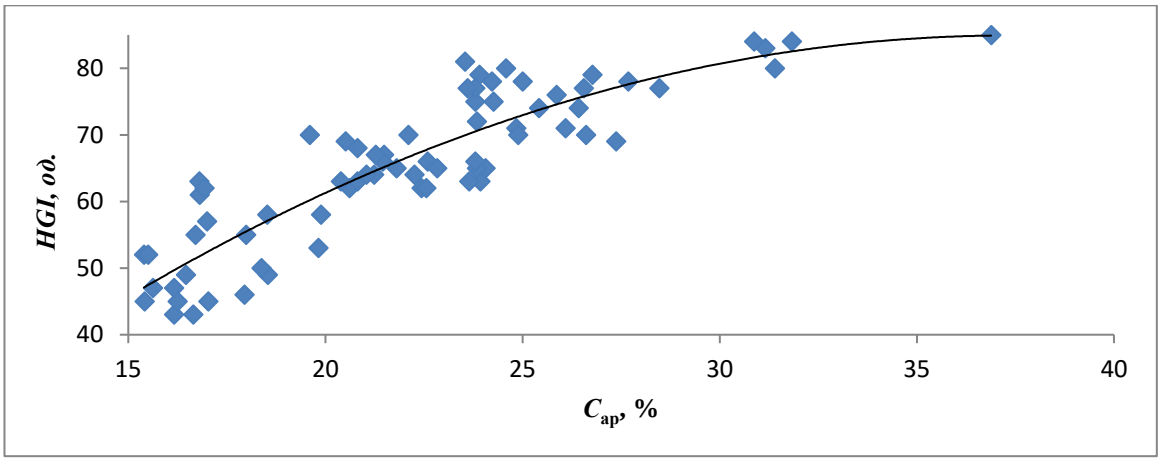


Рис. 3.6 – Графік залежності коефіцієнта розмолоздатності по Хардгрову *HGI* від вмісту ароматичного вуглецю C_{ap}

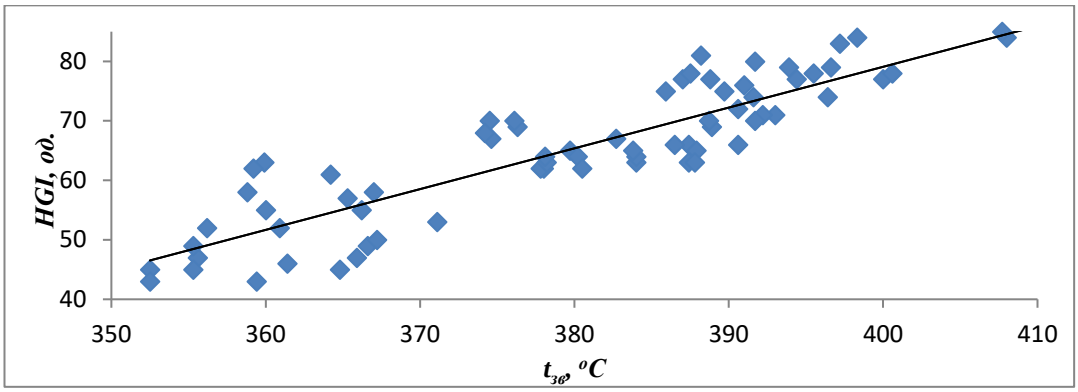


Рис. 3.7 – Графік залежності коефіцієнта розмолоздатності по Хардгрову *HGI* від температури займання вугілля $t_{зв}$

У табл. 3.5 наведено математичні залежності (3.3)–(3.9) та статистична оцінка залежностей показника *HGI* від досліджених показників властивостей вугілля. Аналіз залежностей та їхньої статистичної оцінки показує, що вивчені взаємозв'язки характеризуються високими коефіцієнтами кореляції (0,84–0,89) та детермінації (70,1–79,2 %).

Таблиця 3.5

Математичні залежності та їх статистична оцінка

№ залежності	Вид залежності	Статистична оцінка[1]	
		r	*D*, %
(3.3)	$HGI = 41{,}09 \cdot R_0 + 24{,}688$	0,88	77,4
(3.4)	$HGI = -1{,}594 \cdot V^{daf} + 115{,}06$	0,88	77,4
(3.5)	$HGI = 4{,}2736 \cdot C^{daf} - 303{,}56$	0,89	79,2
(3.6)	$HGI = -5{,}0317 \cdot O_d^{daf} + 93{,}416$	0,84	69,9
(3.7)	$HGI = -1{,}8634 \cdot \delta^2 + 47{,}698 \cdot \delta - 212{,}79$	0,88	77,7
(3.8)	$HGI = -0{,}0786 \cdot C_{ap}^2 + 5{,}8687 \cdot C_{ap} - 24{,}652$	0,89	79,2
(3.9)	$HGI = 0{,}6855 \cdot t_{зв} - 195{,}12$	0,89	79,2

Виходячи з показників, з якими корелює величина *HGI*, можна дійти висновку, що остання є параметром, що залежить від вмісту вуглецю та

[1] r – коефіцієнт множинної кореляції; D – коефіцієнт детермінації.

ступеня впорядкованості структури органічної маси вугілля. Підвищення його абсолютної величини пов'язане зі зростанням у вугіллі вмісту загального (C^{daf}) та ароматичного (C_{ap}) вуглецю, а також ступеня ненасиченості його структури (δ).

Показник *HGI* також зростає зі зростанням показника відбиття вітриніту та температури займання, а також зі зниженням виходу летких речовин вугілля. Слід зазначити, що ці показники також побічно відображають структурні особливості *OMB*. Так, показник відображення вітриніту пов'язаний з наявністю тієї чи іншої кількості циклічно полімеризованого вуглецю в *OMB*. Вихід летких речовин і температура загоряння вугілля відображають термостійкість *OMB*, що залежить від частки аліфатичних та ароматичних складових макромолекул *OMB*.

За розробленими математичними залежностями (3.3) та (3.4) було розраховано значення коефіцієнтів розмолоздатності по Хардрову коксівного (неокисненого) вугілля різних марок та груп у рамках введеного в Україні ДСТУ 3472:2015 «Вугілля буре, кам'яне та антрацит. Класифікація». У табл. 3.6 наведені розраховані значення коефіцієнтів розмолоздатності по Хардгрову, а також їх інтервали для коксівного вугілля різних марок і груп.

Аналізуючи наведені у таблицях дані, можна констатувати, що використане в дослідженні вугілля відповідає заявленій марочній приналежності.

Для дослідженої вибірки між показниками властивостей вугілля та величиною *f* розраховували коефіцієнти парної кореляції.

Значимість коефіцієнтів кореляції *r* перевіряли порівнянням абсолютної величини добутку $|r|\sqrt{n-1}|$ з його критичним значенням *H* при заданій надійності висновку P [49] аналогічно тому, як це було зроблено у п 3.1 щодо коефіцієнта розмолоздатності *HGI* по Хардгрову. У даному випадку критичне значення *H* за ймовірності *P*=0,95 для 14 проб становить 1,92.

Таблиця 3.6

Значення коефіцієнта розмолоздатності по Хардгрову коксівного вугілля в рамках ДСТУ 3472:2015

Вугілля	Позначення		Показник відбиття вітриніту, *Ro*, %	Вихід летких речовин, V^{daf}, %	Коефіцієнт розмолоздатності по Хардгрову, *HGI*, од.		
	Марка	Група			за (3.3)	за (3.4)	об'єднаний інтервал
Газове	Г	Г 1	0,60–0,69	38–44	49–53	54–45	45–54
		Г 2	0,70–0,79	36–42	53–57	58–48	48–58
Газове жирне піснувате	ГЖП		0,80–0,89	33–39	58–61	62–53	53–62
Газове жирне	ГЖ		0,80–0,89	33–38	58–61	62–53	53–62
Жирне	Ж		0,90–1,19	28–36	62–74	70–58	58–74
Коксівне	К	К 1	1,04–1,19	28–30	67–74	70–67	67–74
		К 2	1,20–1,49	18–28	74–86	86–70	70–86
Піснувате спікливе	ПС		1,50–1,69	14–22	86–94	93–80	80–94

3.2 Вплив основних показників якості вугілля на показник його механічної міцності по Протод'яконову.

Згідно ДСТУ 4096–2002 «Методи відбору та підготовки проб до лабораторних випробувань», були відібрані вугільні концентрати, що входять до сучасної сировинної бази коксохімічних підприємств України.

Відібрані вугільні концентрати досліджували щодо впливу їх складу, будови та властивостей вугілля на показник подрібнення вугілля, в даному випадку коефіцієнт міцності *f*. 14 проб вугілля, що характеризуються різним ступенем метаморфізму та петрографічної однорідності, було досліджено за такими параметрами: технічний аналіз (A^d , S^d_t, V^{daf}), пластометричний аналіз (x, y), петрографічний аналіз (R_0, $_{Vt}$, S_v, *I, L, ΣOK*, рефлектограма вітриніту), гранулометричний аналіз (>10; 6–10; 3–6; 1–3; 0,5–1, <0,5 мм), показник окиснення (*Δt*). Результати досліджень наведені в табл. 3.7-3.10.

Аналізуючи наведені у таблицях дані, можна констатувати, що використане в дослідженні вугілля відповідає заявленій марочній приналежності.

Для дослідженої вибірки між показниками властивостей вугілля та величиною f розраховували коефіцієнти парної кореляції. Значимість коефіцієнтів кореляції r перевіряли порівнянням абсолютної величини добутку $|r|\sqrt{n-1}|$ з його критичним значенням H при заданій надійності висновку P аналогічно тому, як це було зроблено у п 3.1 щодо коефіцієнта розмолоздатності *HGI* по Хардгрову. У даному випадку критичне значення *H* за ймовірності *P*=0,95 для 14 проб становить 1,92.

Таблиця 3.7

Технологічні властивості дослідженого вугілля

Постачальник	Марка	Технічний аналіз, %			Пластометричні показники, мм		Показник окиснення, °С	Коефіцієнт розмолоздатності по Хардгрову, од.	Коефіцієнт міцності по Протод'яконову, од.
		A^d	S^d_t	V^{daf}	x	y	Δt	HGI	f
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ТОВ «Ресурс»	Г	9,9	0,34	37,7	36	11	4	48	1,05
ЦЗФ «Жовтненева»	Г	7,2	1,32	38,6	42	14	6	38	1,37
Rock Leack	Ж	7,9	1,08	34,3	27	24	2	60	0,86
Wellmore	Ж	7,6	1,05	32,5	25	22	5	63	0,81
ЦЗФ «Щедрухінська»	Ж	9,5	0,53	35,7	5	30	4	66	0,77
ЗФ «Березовська»	Ж	8,6	0,51	32,5	-8	24	2	64	0,72
Integrity	К	7,5	1,14	25,2	24	16,5	2	80	0,76
ЗФ «Свято-Варваринська»	К	7,2	0,63	27,6	17	15	2	75	0,65
ЗФ «Східна»	К+КП	10,8	0,39	26,3	18	17,5	5	69	0,64
ЗФ «Березовська»	КП	7,6	0,40	21,3	27	12	5	75	0,88

Продовження табл. 3.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Розріз «Краснобродський»	КС	7,8	0,32	24,7	32	7	2	70	0,93
ТОВ «Барзаське товариство»	КС	8,6	0,27	20,3	28	9	6	77	0,68
ЗФ «Березовська»	ПС	9,9	0,33	19,2	21	9	5	86	0,75
Pocahontas	ПС	8,9	0,71	18,3	10	12	4	84	0,65
Максимальне		10,8	1,32	38,6	42	30	6	86	1,37
Мінімальне		7,2	0,27	18,3	-8	7	2	38	0,64
Середнє		8,5	0,64	28,2	22	16	4	68	0,82

Таблиця 3.8

Петрографічна характеристика дослідженого вугілля

Постачальник	Марка	Петрографічний склад (без мінеральних домішок),%					Середній показник відбиття вітриніту, %	Стадії метаморфізму вітриніту, %					
								0,50–0,79	0,80–0,89	0,90–1,19	1,20–1,49	1,50–1,69	1,70–2,59
								Марки вугілля, що умовно відповідають стадіям метаморфізму вітриніту.					
		V_t	S_v	I	L	$\sum OK$	R_0	ДГ+Г	ГЖО+ГЖ	Ж	К	ПС	П
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ТОВ «Ресурс»	Г	81	0	18	1	18	0,73	88	12	0	0	0	0
ЦЗФ «Жовтненева»	Г	69	0	26	11	26	0,72	95	5	0	0	0	0
Rock Leack	Ж	85	0	12	3	12	0,96	2	19	78	1	0	0
Wellmore	Ж	75	0	22	3	22	0,94	5	25	70	0	0	0
ЦЗФ «Щедрухінська»	Ж	90	0	9	1	9	0,93	0	31	69	0	0	0
ЗФ «Березовська»	Ж	95	0	5	0	15	1,01	0	0	100	0	0	0
Integrity	К	81	0	18	1	18	1,22	10	11	20	39	18	2

Продовження таблиці 3.8

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ЗФ «Свято-Варваринська»	К	86	1	12	1	13	1,20	0	0	50	50	0	0
ЗФ «Східна»	К+КП	76	0	23	3	23	1,18	0	0	60	40	0	0
ЗФ «Березовська»	КП	47	2	51	0	53	1,20	0	0	53	42	4	0
Розріз «Краснобродський»	КС	43	2	56	0	58	1,03	2	14	74	8	0	3
ТОВ «Барзаське товариство»	КС	24	1	75	0	76	1,19	0	0	52	48	0	0
ЗФ «Березовська»	ПС	69	0	31	0	31	1,54	0	0	0	42	49	9
Pocahontas	ПС	69	1	30	0	31	1,51	0	0	0	45	53	2
Максимальне		95	0	75	11	76	1,54	95	31	100	50	53	9
Мінімальне		24	2	5	0	9	0,72	0	0	0	0	0	0
Середнє		70,7	0,5	27,7	1,7	28,9	1,10	14,4	8,4	44,7	22,5	8,9	1,1

Таблиця 3.9

Елементний склад дослідженого вугілля

Постачальник	Марка	Елементний склад, %				
		C^{daf}	H^{daf}	N^{daf}	S_t^d	O_d^{daf}
ТОВ «Ресурс»	Г	83,51	5,43	2,17	0,34	8,55
ЦЗФ «Жовтненева»	Г	83,39	5,84	1,52	1,32	7,93
Rock Leack	Ж	86,40	5,58	1,57	1,08	5,37
Wellmore	Ж	86,28	4,91	1,67	1,13	6,01
ЦЗФ «Щедрухінська»	Ж	86,38	5,79	2,67	0,53	4,63
ЗФ «Березовська»	Ж	86,22	5,80	2,97	0,51	4,50
Integrity	К	87,96	5,10	1,65	1,14	4,15
ЗФ «Свято-Варваринська»	К	87,50	5,36	1,70	0,66	4,78
ЗФ «Східна»	К+КП	88,80	5,15	1,75	0,39	3,91
ЗФ «Березовська»	КП	87,45	4,86	2,10	0,40	5,19
Розріз «Краснобродський»	КС	87,85	4,67	2,38	0,32	4,78
ТОВ «Барзаське товариство»	КС	88,31	4,74	2,03	0,27	4,65
ЗФ «Березовська»	ПС	89,89	4,83	2,33	0,33	2,62
Pocahontas	ПС	90,51	4,52	1,32	0,72	2,93
Максимальне		90,51	5,84	2,97	1,32	8,55
Мінімальне		83,39	4,52	1,32	0,27	2,62
Середнє		87,18	5,18	1,99	0,65	5,00

Таблиця 3.10

Гранулометричний склад

Постачальник	Марка	Гранулометричний склад (мм), %									Середній діаметр частинок, мм
		>50	50–25	13–25	6–13	3–6	1–3	0,5–1	<0,5	<3	d_s
ТОВ «Ресурс»	Г	0,0	4,3	12,0	17,6	19,4	22,5	9,6	14,6	46,8	6,99
ЦЗФ «Жовтненева»	Г	15,8	12,9	20	16,7	8,1	15,1	5,4	6	26,5	22,80
Rock Leack	Ж	0,0	8,1	11,8	12,9	15,7	19,2	10,6	21,6	51,4	7,75
Wellmore	Ж	0,0	3,9	9,0	22,6	14,1	19,5	12,1	18,8	50,4	6,48
ЦЗФ «Щедрухінська»	Ж	0,0	0,0	5,5	7,6	13,4	24,8	19,2	29,4	73,5	3,09
ЗФ «Березовська»	Ж	0,0	0,8	2,8	7,0	11,7	25,7	18,3	33,8	77,8	2,74
Integrity	К	0,0	4,5	9,8	8,7	12,5	22,8	16,3	25,4	64,5	5,58
ЗФ «Свято-Варваринська»	К	0,0	8,1	7,3	16,9	17,7	17,7	8,1	24,2	50,0	7,30
ЗФ «Східна»	К+КП	0,0	0,3	4,5	5,2	9,7	24,5	23,7	32,0	80,3	2,65
ЗФ «Березовська»	КП	14,9	7,1	10,5	7,4	10,3	20,2	11,1	18,4	49,7	17,58
Розріз «Краснобродський»	КС	18,8	6,0	9,4	10,9	11,2	17,2	9,4	17,2	43,7	20,14
ТОВ «Барзаське товариство»	КС	3,3	5,6	10,0	12,5	14,1	21,0	11,7	21,9	54,6	8,82
ЗФ «Березовська»	ПС	9,3	13,5	9,8	6,4	7,7	16,5	16,3	20,6	53,3	15,33
Pocahontas	ПС	0,0	0,0	3,2	7,3	8,3	23,8	23,2	34,2	81,2	2,41
Максимальне		18,8	13,5	20,0	22,6	19,4	25,7	23,7	34,2	81,2	22,8
Мінімальне		0,0	0,0	2,8	5,2	7,7	15,1	5,4	6,0	26,5	2,41
Середнє		4,4	5,4	9,0	11,4	12,4	20,8	13,9	22,7	57,4	9,26

У табл. 3.11 показані значення коефіцієнтів кореляції r та добутку $|r|\sqrt{n-1}$ для кожного вивченого взаємозв'язку.

Таблиця 3.11

Коефіцієнти парної кореляції і значення $|r|\sqrt{n-1}$ досліджених взаємозв'язків

Показник	R_0	V^{daf}	C^{daf}	$O_d{}^{daf}$	d_s	HGI
r	-0,693	0,586	-0,770	0,798	0,689	-0,807
$\|r\|\sqrt{n-1}$	2,499	2,113	2,776	2,877	2,484	2,910

Як видно з наведених у таблиці даних, між коефіцієнтом міцності f по Протод'яконову та показниками R_0, V^{daf}, C^{daf}, $O_d{}^{daf}$, d_s та HGI, що характеризують склад, будову та властивості вугілля, встановлені значення коефіцієнтів кореляції, що перевищують 0,5. Для цих взаємозв'язків також характерні максимальні значення добутку $|r|\sqrt{n-1}$, що свідчить про їхню адекватність.

На рис. 3.8–3.12 наведено графічні залежності коефіцієнта подрібнюваості за Протод'яконовим (f) від показників якості вугілля,

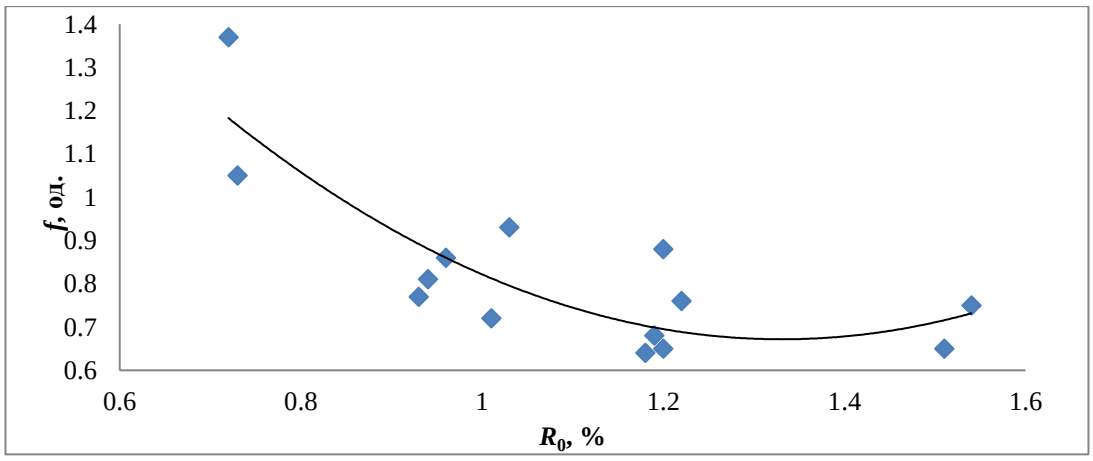


Рис. 3.8 – Вплив середнього показника відбиття вітриніту R_0 на коефіцієнт міцності по Протод'яконову f

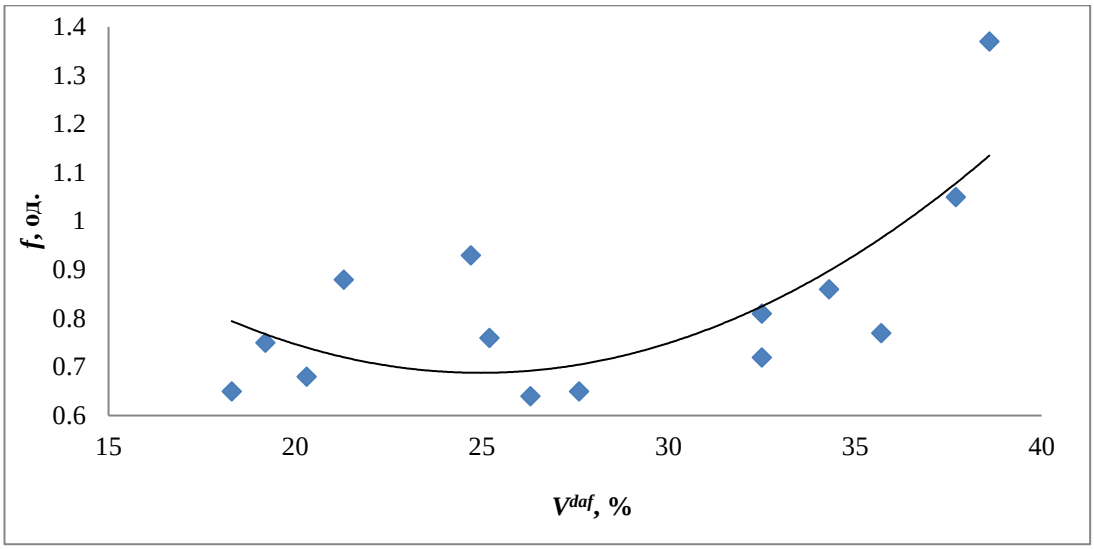


Рис. 3.9 – Вплив виходу летких речовин V^{daf} на коефіцієнт міцності по Протод'яконову f

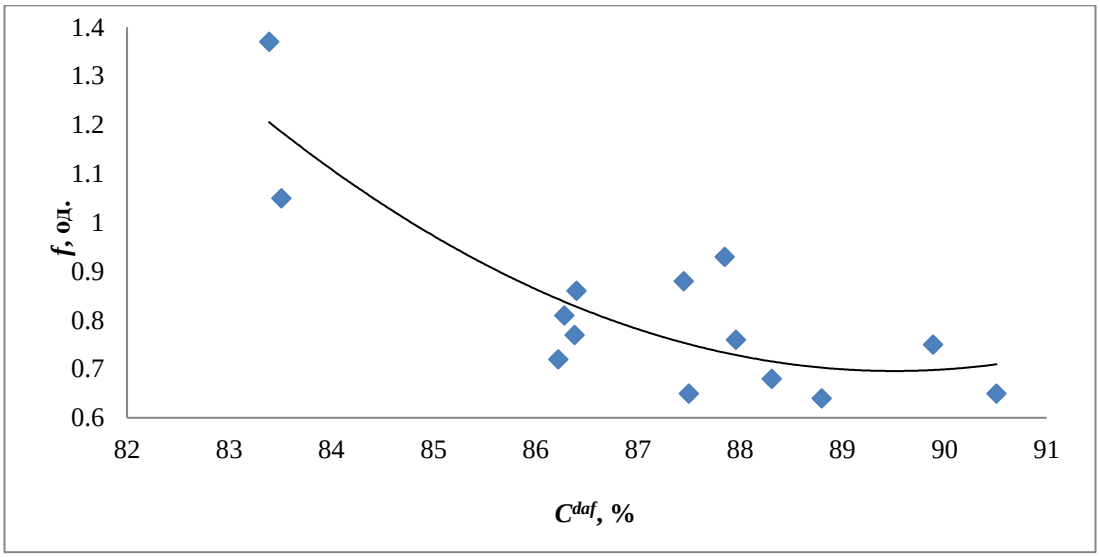


Рис. 3.10 – Вплив вмісту вуглецю C^{daf} на коефіцієнт міцності по Протод'яконову f

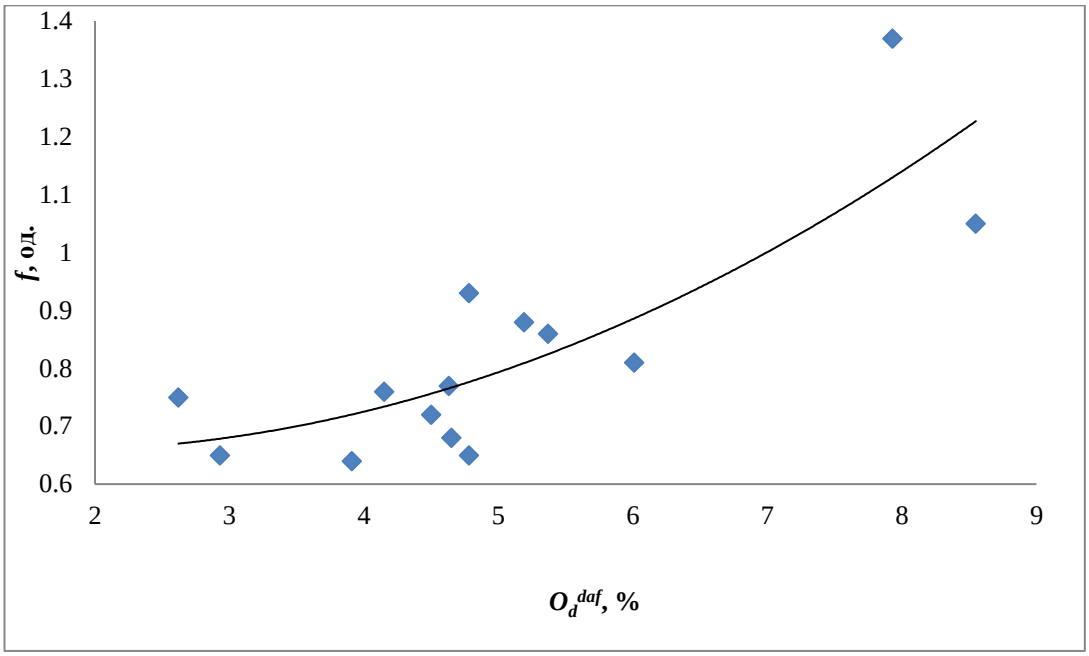


Рис. 3.11 – Вплив вмісту кисню O^{daf}_d на коефіцієнт міцності по Протод'яконову f

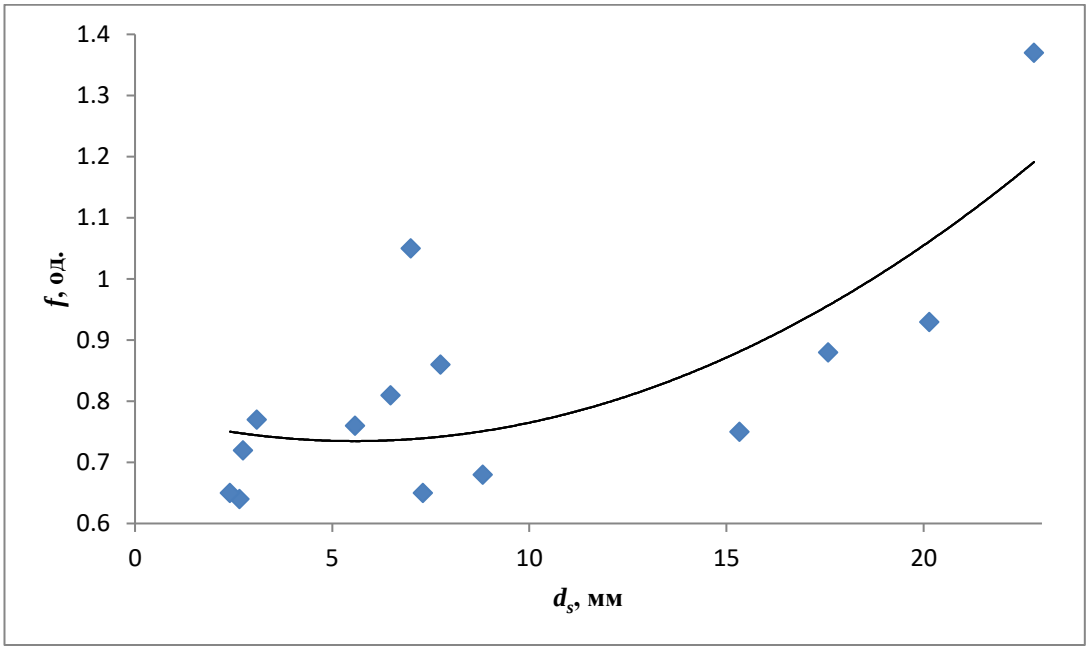


Рис. 3.12 – Вплив середнього діаметру частинок d_s на коефіцієнт міцності по Протод'яконову f

Вони характеризують ступінь їх метаморфізму ($R_{0,}$ V^{daf}, C^{daf}, O_d^{daf}), а також середнього діаметру частинок досліджуваної проби вугілля.

Аналіз цих графічних залежностей показує, що вони можуть бути адекватно описані квадратичним поліномом. (коефіцієнт кореляції становить 0,65–0,77).

У табл. 3.12 наведено математичні залежності (3.10)–(3.14) та статистична оцінка показника f від досліджених показників властивостей вугілля які дозволяють успішно прогнозувати відповідне значення коефіцієнта міцності.

Таблиця 3.12

Математичні залежності та їх статистична оцінка

№	Вид залежності	Статистична оцінка[2]	
		r	*D, %*
(3.10)	$f=1{,}3695\cdot R_0^{\,2} - 3{,}6455\cdot R_0 + 3{,}0978$	0,84	71,1
(3.11)	$f=0{,}0024\cdot (V^{daf})^2 - 0{,}1199\cdot V^{daf} + 2{,}1846$	0,74	55,0
(3.12)	$f= 0{,}0136\cdot (C^{daf})^2 - 2{,}4376\cdot C^{daf} + 109{,}79$	0,85	71,6
(3.13)	$f=0{,}0119\cdot (O_d^{daf})^2 - 0{,}0385\cdot O_d^{daf} + 0{,}6895$	0,82	67,4
(3.14)	$f = 0{,}0015\cdot (d_s)^2 + 0{,}0171\cdot d_{cp} + 0{,}7825$	0,74	55,2
(3.15)	$f = 0{,}0004\cdot HGI^{\,2} - 0{,}0599\cdot HGI + 3{,}0722$	0,90	81,4

Також в таблиці представлена встановлена залежність коефіцієнт міцності по Протод'яконову f від коефіцієнта розмолоздатності за Хардгровом.

Виходячи з показників, з якими корелює величина f, можна зробити висновок, що даний параметр залежить від вмісту кисню (O_d^{daf}), вуглецю (C^{daf}), показника відображення вітриніту (R_o) виходу летких речовин (V^{daf}), середнього діаметра частинок (d_s).

[2] r – коефіцієнт множинної кореляції; D – коефіцієнт детермінації.

При цьому залежність коефіцієнта міцності по Протод'яконову *f* від виходу летких речовин, вмісту кисню та середнього діаметра частинок носить прямо пропорційний характер, а від показника середнього відображення вітриніту та вмісту кисню вуглецю – зворотно пропорційний

За розробленими математичними залежностями (3.10) та (3.11) було розраховано значення коефіцієнта міцності по Протод'яконову коксівного (неокисненого) вугілля різних марок та груп у рамках введеного в Україні ДСТУ 3472:2015 «Вугілля буре, кам'яне та антрацит. Класифікація». У табл. 3.13 наведені розраховані значення коефіцієнтів міцності по Протод'яконову, а також їх інтервали для коксівного вугілля різних марок і груп.

3.3 Встановлення взаємозв'язку між коефіцієнтом міцності за методом Протод'яконова та коефіцієнтом розмолоздатності вугілля за методом Хардгрова.

Дані щодо механічної міцності вугілля, вираженої коефіцієнтами Хардгрова та Протод'яконова, які представлені у табл. 3.13, свідчать, що значення коефіцієнта розмолоздатності *HGI* в діапазоні взятої вибірки коливаються від 38 до 84 од., а показника дроблення по Протод'яконову *f* – від 0,54 до 1,37 од. Також з даних таблиці можна побачити, що коефіцієнт розмолоздатності по Хардгрову *HGI* задовільно класифікує вугілля за рівнем їхнього опору подрібнюючим зусиллям. Так він коливається в межах 38-48 од. для вугілля газової групи; 60-66 од. – для вугілля жирної групи; 69-80 од. – для вугілля коксівної групи та 84-86 од. – для вугілля піснувато спікливої групи.

Те саме можемо сказати й щодо можливості задовільно класифікувати вугілля за показником дроблення по Протод'яконову *f*. Для вугілля газової групи цей показник коливається в інтервалі 1,05-1,37 од.; жирної групи – від 0,55 до 0,86 од.; коксівної групи – від 0,54 до 0,93 од.; піснувато спікливої групи – 0,65-0,75 од.

Таблиця 3.13

Значення коефіцієнта міцності за Протод`яконовим (*f*) коксівного вугілля в рамках ДСТУ 3472:2015

Вугілля	Позначення		Показник відбиття вітриніту, *Ro*, %	Вихід летких речовин, V^{daf}, %	Коефіцієнт міцності за Протод`яконовим, (*f*), од.		
	Марка	Група			за (3.10)	за (3.11)	об'єднаний інтервал
Газове	Г	Г 1	0,60–0,69	38–44	1,40–1,23	1,09–1,56	1,09–1,56
		Г 2	0,70–0,79	36–42	1,22–1,07	0,98–1,38	0,98–1,38
Газове жирне піснувате	ГЖП		0,80–0,89	33–39	1,06–0,94	0,84–1,16	0,84–1,16
Газове жирне	ГЖ		0,80–0,89	33–38	1,06–0,94	0,84–1,09	0,84–1,09
Жирне	Ж		0,90–1,19	28–36	0,93–0,70	0,71–0,98	0,70–0,98
Коксівне	К	К 1	1,04–1,19	28–30	0,70–0,71	0,71–0,75	0,70–0,75
		К 2	1,20–1,49	18–28	0,79–0,71	0,80–0,71	0,71–0,80
Піснувате спікливе	ПС		1,50–1,69	14–22	0,71–0,85	0,98–0,71	0,71–0,98

Спираючись на отримані дані, нами було побудовано графік залежності коефіцієнта міцності *f* від коефіцієнта розмолоздатності *HGI* (рис. 3.13).

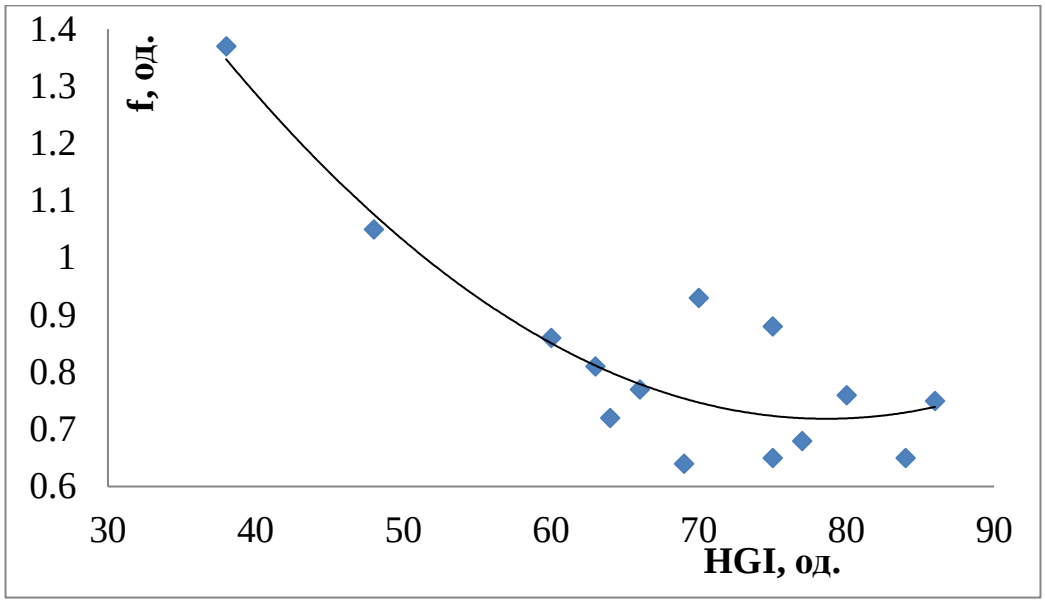


Рис. 3.13 – Графік залежності коефіцієнту міцності *f* від коефіцієнта розмолоздатності *HGI*

Аналізуючи представлену залежність, можна дійти висновку, що обидва показники взаємопов'язані, а коефіцієнт взаємокореляції становить 0,90.

Слід відзначити, що вплив показників якості вугілля на коефіцієнт міцності за Протод'яконовим (*f*) значно нижчий (R^2=0,550-0,716), ніж на коефіцієнт його розмолоздатності за Хардгровим (*HGI*): R^2=0,807-0,937. Виходячи з цього, для прогнозування розмолоздатності вугілля краще використовувати метод Хардгрова, а не метод Протод'яконова. Також було розроблено залежність (3.15), що дає можливість передбачати розмолоздатність вугілля за наявності одного з двох значень. Зв'язок між цими двома методами встановлено вперше.

$$f = 0{,}0004 \cdot HGI^2 - 0{,}0599 \cdot HGI + 3{,}0722 \qquad (3.15)$$

Відзначимо, що факт подібного зв'язку підтверджує раніш отримані висновки [50], що показники всіх механічних властивостей вугілля між собою пов'язані кореляційними зв'язками. Таким чином, для визначення

міцнісних характеристик можна використовувати будь-який об’єктивний метод, зокрема метод товчення, який засновано на визначенні ступеня зруйнування вугілля за витратами роботи на руйнування. Для цих цілей можуть бути застосовані методи копра (як то метод Протод’яконова у нашому дослідженні), роздавлювання в циліндрі або розмелювання (метод Хардгрова) з оцінкою показників розмолоздатності вугілля, що відображає взаємне відношення витрат енергії на розмелювання досліджуваного та еталонного палива.

Отримані нами результати також підтверджують наявність певної межі послаблення міцності вугілля, вираженої коефіцієнтами *f*, HGI чи будь яким іншим, з підвищенням стадії його метаморфізму. Ослаблення міцності або підвищення коефіцієнтів розмолоздатності по мірі переходу до вугілля середньої стадії метаморфізму, пов'язане, мабуть, зі зниженням довжини бічних ланцюгів макромолекул і видаленням кисню у вигляді двоокису вуглецю і води. Це послаблює структуру внаслідок зменшення хімічного зв'язку через кисневі містки та зменшення ролі водневого зв’язку. Зростання ж міцності у вугіллі високої стадії метаморфізму пояснюється зростанням сіток вуглецю з орієнтацією паралельних сіток у пакети та збільшенням між’ядерних зв'язків, створюваних вуглецевими валентностями. Мінімум міцності вугілля середньої стадії метаморфізму пояснюється тим, що на цій стадії обидва протилежні процеси врівноважують один одного.

Тож на підставі отриманих результатів метод Хардгрова можна рекомендувати для використання з метою оптимізації роботи подрібнюючих відділень вуглепідготовчих цехів на коксохімічних та металургійних підприємствах.

3.4 Визначення спікливості і спікливої здатності вугілля.

Як відомо, вихідна шихта для отримання металургійного коксу може включати 5-8 і більше марок вугілля, що істотно різняться за своїми властивостями [51-53]. Внесення вуглеводневої добавки, зокрема – пеку, в готову шихту або в один з її компонентів перед їх змішуванням може

вплинути на характер формування властивостей отримуваного коксу. Визначення оптимального способу внесення пеку в шихту, своєю чергою, вимагає знання результатів взаємодії кам'яновугільного пека з вугіллям різних марок при їх піролізі. З метою вивчення цього питання нами було вивчено вплив кам'яновугільних пеків на спікливість індивідуального вугілля, що істотно різниться за своїми властивостями. З урахуванням можливих механізмів спікання вугільних зерен у присутності кам'яновугільного пеку, при виборі вугілля ми орієнтувалися насамперед на вихід летких речовин та пластометричні показники. Властивості пеків, використаних для випробувань, представлені в таблиці 3.14.

Таблиця 3.14

Технологічні властивості досліджених пеків

Характеристика	Зразок №	
	№1	№ 2
Температура розм'якшення (за методом «кільця і стрижня»), °С	86	135
В'язкість при 185°С, сП	375,0	<0,3
Вихід летких речовин при 850°С, %	53,4	38,3

Як видно з наведених у таблиці даних, два зразки промислових товарних кам'яновугільних пеків різняться за основними властивостями, що мають визначальне значення для процесу спікання з твердим наповнювачем. До таких властивостей відносяться: температура розм'якшення і в'язкість, що відповідають за змочування пеком зерен наповнювача, і вихід летких речовин, що визначає як кількість твердого коксового залишку, утворюваного пеком, так і ступінь екологічної безпеки пеку в процесі його термічних перетворень.

Для визначення спікливості пеків з вугіллям нами була використана методика, розроблена в ДП «УХІН» [41-44]. Показник спікливості вугілля за цим методом є оцінка міцності кускового залишку, що спікся. Оскільки

процес спікання вугілля та шихт завершується утворенням напівкоксу, то саме міцність напівкоксу є об'єктивною характеристикою спікання [54].

В ході випробувань суміші індивідуального вугілля та пеків, подрібнених до аналітичного ступеня крупності (≤ 0,25 мм) формували у спеціальній матриці за допомогою гідравлічного преса при однаковому тиску, після чого нагрівали зі швидкістю 10 °С/хв до температури 680 °С, при якій витримували протягом 30 хв. Вміст у пробах вугілля та пеків становило, відповідно, 97 і 3 % за масою. Для кращого формування суміш зволожували. Всі формування до нагрівання являли собою циліндри висотою 17 і діаметром 11 мм. Тверді залишки, отримані в результаті напівкоксування, виймали з матриці та визначали їхню міцність на зсув. Отримані результати (середнє з п’яти визначень) використовували як показники спікливості.

Отримані результати не можна вважати абсолютними чисельними характеристиками дослідженого вугілля та кам'яновугільних пеків, проте вони можуть бути використані для порівняння характеру взаємодії вугілля різного ступеня метаморфізму з кам'яновугільним пеком при коксуванні.

Результати досліджень представлені у табл. 3.15, а на рисунках 3.13, 3.14 – графічні залежності втрати маси вугільної формовки після спікання та її міцності на зсув від коефіцієнта розмолоздатності *HGI*.

Аналізуючи дані таблиці 3.15 та рис. 3.14, 3.15, можна побачити, що додавання обох кам'яновугільних пеків призвело до збільшення втрати маси в процесі напівкоксування вугілля марок *Г* і *ПС*, що мають близькі значення показника у (14 і 12 мм відповідно), а також максимальним (вугілля *Г*, V^{daf}=38,6 %) та мінімальним (вугілля *ПС*, V^{daf} = 18,3 %) серед дослідженого вугілля значеннями виходу летких речовин. Вугілля марки *Ж* характеризується максимальним значенням товщини пластичного шару у (22 мм) та досить високим виходом летких речовин (32,5 %) у присутності обох пеків і має деяке зниження втрати маси при напівкоксуванні, що свідчить про інтенсифікацію термохімічних перетворень, що призводять до переходу рідких проміжних продуктів напівкоксування у тверду фазу.

Таблиця 3.15

Результати визначення спікання вугілля з пеками

№	Вугіл-ля	Пек	Маса формовки, г			Розмір залишку після напів-коксування, мм, висота/діаметр	Міц-ність на зсув, МПа
			до напів-коксування	після напів-коксування	втрата маси, %		
1	Г	1	2,43	1,49	38,7	21,0/12,0	26,58
2		2	2,37	1,48	37,6	21,8/11,5	30,79
3		-	2,38	1,50	37,0	22,0/12,0	21,67
4	Ж	1	2,38	1,58	33,6	30,0/12,5	3,82
5		2	2,42	1,64	32,2	36,0/12,3	2,75
6		-	2,42	1,60	33,9	32,0/12,0	11,77
7	ПС	1	2,34	1,77	24,4	24,0/12,0	23,92
8		2	2,37	1,79	24,5	23,0/11,5	28,05
9		-	2,32	1,77	23,7	20,0/12,0	38,05

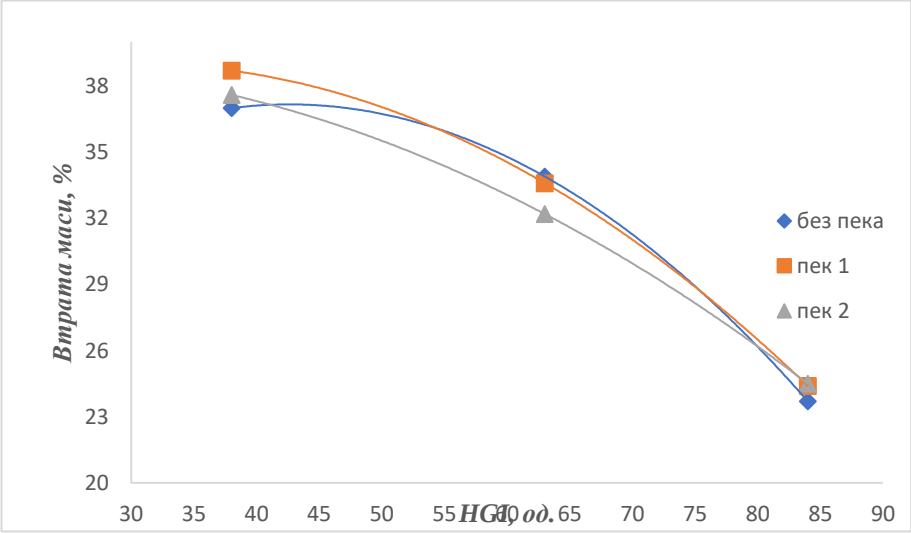


Рис. 3.14 – Графік залежності втрати маси вугільної формовки після спікання від коефіцієнта розмолоздатності *HGI*.

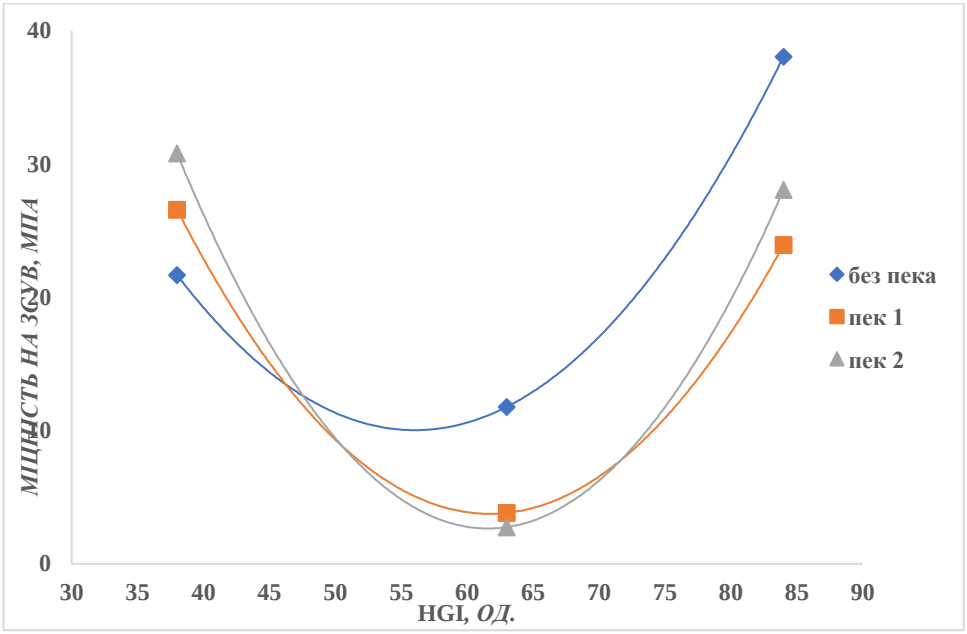


Рис. 3.15 – Графік залежності міцності на зсув вугільної формовки після спікання від коефіцієнта розмолоздатності *HGI*.

Цей ефект особливо помітний у присутності пеку з нижчим виходом летких речовин і більшою в'язкістю (зразок № 2), що вказує на переважну участь в інтенсифікації термічних процесів ущільнення рідких, а не газоподібних продуктів.

Це підтверджується і тим фактом, що для цієї пари «вугілля-пек» (дослід № 5) характерний найбільший приріст лінійних розмірів напівкоксового залишку в порівнянні як з вихідним формуванням, так і з напівкоксовим залишком вугілля марки *Ж* без добавки (дослід № 6). Також для слід відзначити, що у даному випадку, спостерігається найнижчі показники міцності на зсув вугільної формовки після скікання, як з додаванням пеків, так і в чистому вигляді. Особливо наочно це помітно на рис. 3.15 (найнижчі показники міцності на зсув спостерігаються при значеннях *HGI ~ 50-70* од.). Це є наслідком збільшення в'язкості рідкої пластичної фази вугілля при її термохімічній взаємодії з компонентами кам'яновугільного пеку, в результаті чого ускладнюється відтік парогазових продуктів напівкоксування і спостерігається ефект спучування. Останнє є

однозначно негативним з технологічного погляду фактом, оскільки у промисловості загрожує руйнуванням кладки коксових печей. Спучування формування вугілля марки *Ж* без пекових домішок також є максимальним серед дослідженого вугілля. Характерно, що вугілля марки *ПС* з добавками пеків спучується істотно менш виражено, а внесення пеків у вугілля марки *Г* (що має більший вихід летких речовин, але майже вдвічі менший показник у, ніж вугілля марки *Ж*), помітно знижує спучування формування, що піддається термообробці.

Незважаючи на деякий приріст виходу напівкоксу при додаванні пеків у вугілля марки *Ж*, міцність напівкоксового залишку, і без того вкрай низька для цього вугілля, від додавання пеків ще більше знижується. Це можна пояснити як фізико-хімічними властивостями продуктів взаємодії компонентів пластичної маси цього вугілля з компонентами пеків, так і структурою полукоксового залишку. Проте на рис. 3.16 ми бачимо, що сколи напівкоксових залишків всіх трьох зразків вугілля, термооброблених як індивідуально, так і з добавками пеків, не мають виражених відмінностей.

На сколах напівкоксів на основі вугілля марки *Ж* (рис. 3.16, 4-6) видно пори середнього розміру овального перерізу, а скол цього вугілля, отриманого з добавкою пеку № 1 (рис. 3.16, 4), є пухким. Сколи напівкоксів вугілля марки *ПС* (Рис. 3.16, 7-9) мають дрібнозернисту структуру; проте наявність пір та зернистості характерна і для сколів зразків, отриманих на основі вугілля марки *Г* (рис. 3.16, 1-3). Виходячи з відсутності візуально виражених відмінностей у структурі отриманих напівкоксів, припустимо припустити, що відмінності у їх міцності (а, отже, і здатність злипання вихідних компонентів) визначається, головним чином, фізико-хімічними властивостями вихідних матеріалів та напівкоксу.

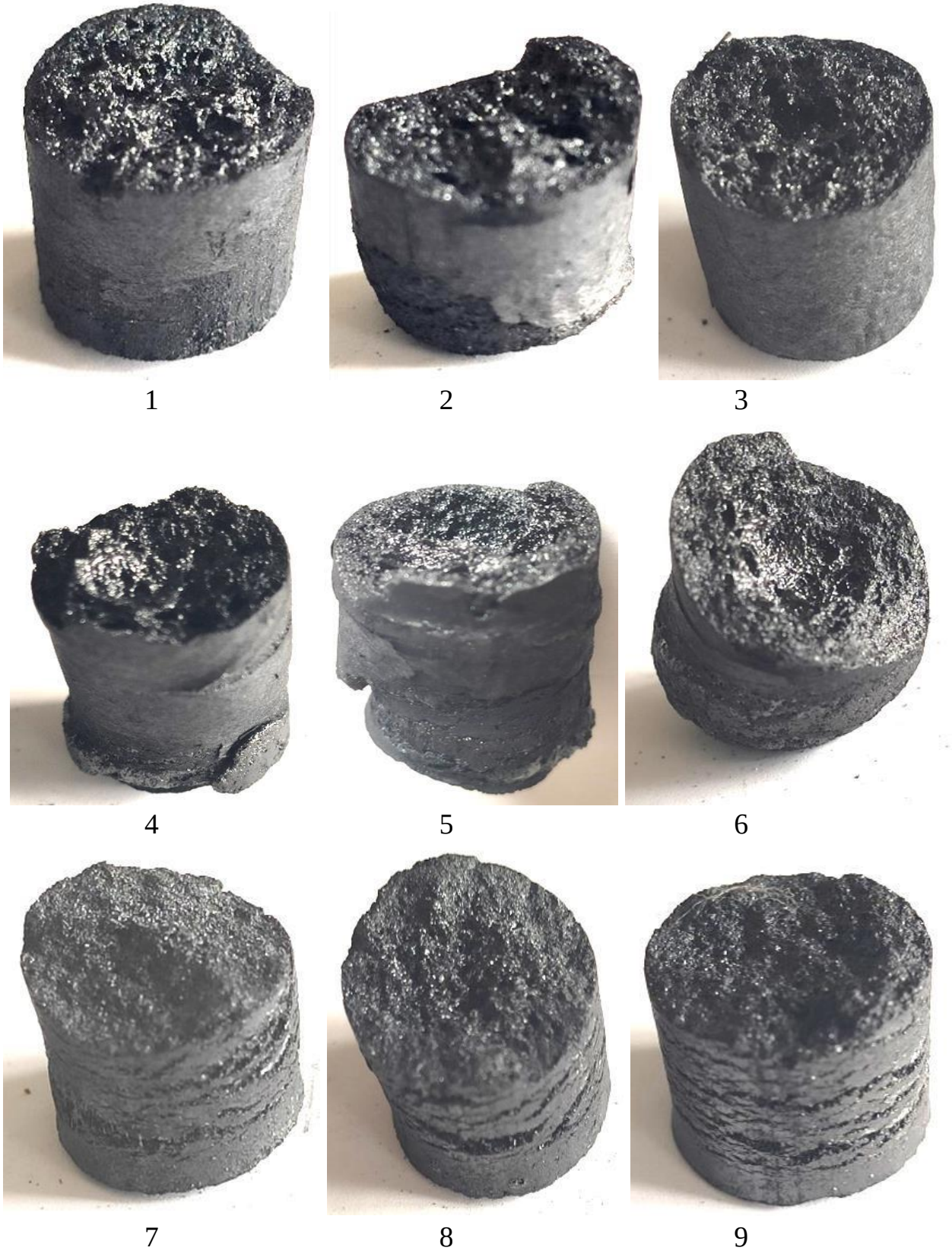


Рис. 3.16 – Вид сколів напівкоксових формувань,
отриманих в результаті дослідів 1-9.

В цілому, з наведених у табл. 3.16 результатів видно такі основні відмінності напівкоксів на основі вугілля марки *Г*: з досліджуваних це єдине вугілля, внесення в яке кам'яновугільних пеків призвело до зниження спучування (збільшення лінійних розмірів формування в результаті напівкоксування) і сприяло приросту міцності напівкоксу (спікання).

Таким чином, у ході даних досліджень позитивний ефект від добавок кам'яновугільного пеку продемонструвало вугілля з незначним показником товщини пластичного шару та максимальним виходом летких речовин. При цьому позитивний ефект для пеку № 2 помітніше, ніж для пеку № 1. Найгірший ефект відзначений для пеку з максимальними показниками товщини пластичного шару та спучування (товщина пластичного шару + вихід летких речовин на рівні вугілля марки *Г*).

ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 3

1. Проведено дослідження взаємозв'язку складу, будови та властивостей вугілля різного типу з показником коефіцієнта розмолоздатності по Хардгрову, а також з показником коефіцієнта міцності за Протод'яконовим. Встановлено, що підвищення коефіцієнта розмолоздатності по Хардгрову викликане зростанням у вугіллі вмісту загального (C^{daf}) та ароматичного (C_{ap}) вуглецю, а також ступеня ненасиченості (δ) структури. Відповідно, збільшення виходу летких речовин, зниження показника вітриніту та температури займання неокисненого вугілля, викликане підвищенням вмісту аліфатичного вуглецю та зниженням ступеня ненасиченості структури *ОМВ* призводить до зниження величини коефіцієнта розмолоздатності по Хардгрову. В свою чергу, збільшення показника відбиття вітриніту та вмісту вуглецю, а також зниження виходу летких речовин, вмісту кисню та середнього діаметра частинок вугілля призводить до зниження величини коефіцієнта міцності вугілля за Протод'яконовим.

2. Вперше встановлено зв'язок між коефіцієнтом міцності за методом Прото`яконова та коефіцієнтом розмолоздатності вугілля за методом Хардгрова. Показано, що показники якості вугілля ($R_0$, $V^{daf}$, $d_s$, $O_d^{daf}$, $C^{daf}$) мають значно нижчий вплив на коефіцієнт міцності за Протод`яконовим (f) (R^2=0,550-0,716) ніж на коефіцієнт розмолоздатності за Хардгровим (HGI) (R^2=0,807-0,937).

3. Показано, що коефіцієнт розмолоздатності Хардгрова та коефіцієнт міцності Протод'яконова задовільно класифікують вугілля за рівнем його опору подрібнюючим зусиллям. Розраховано значення коефіцієнтів розмолоздатності по Хардгрову та коефіцієнтів міцності за Протод'яконовим неокисленого (відновленого) коксівного вугілля окремих марок та груп у рамках ДСТУ 3472:2015 « Вугілля буре, кам'яне та антрацит. Класифікація». Для вугілля марки Г значення HGI коливається в межах 38-48 од., f – від 1,05

до 1,37 од.; для вугілля жирної групи *HGI* = 60-66 од., *f* = 0,55-0,86 од.; для вугілля коксівної групи *HGI* = 69-80 од., *f* = 0,54-0,93 од.; для вугілля піснувато спікливої групи *HGI* = 84-86 од., *f* =0,65-0,75 од.

4. Розроблено графічно-математичні залежності, що дозволяють прогнозувати розмолоздатність вугілля за методами Хардгрова (*HGI*) і Протод`яконова (*f*) на основі визначення показників його якості (R_0, V^{daf}, C^{daf}, O^{daf}_d).

5. Вплив кам’яновугільного пеку на процес та властивості продукту коксування вугілля вкрай вибірковий і залежить від таких властивостей вугілля, як вихід летких речовин та здатність до виділення пластичної маси при нагріванні.

6. Внесення добавки кам’яновугільного пеку у вугілля газової групи здатне знизити спучування вугілля при коксуванні і поліпшити механічну міцність коксу, що утворюється. При цьому позитивні ефекти тим помітніші, чим вища температура розм'якшення пеку. Додавання кам’яновугільного пеку до вугілля, здатного при нагріванні без доступу повітря виділяти значну кількість пластичної маси – показник у на рівні 20 мм (вугілля жирної групи) можуть не тільки негативно позначитися на властивостях отримуваного коксу, але й інтенсифікувати фактори серйозного технологічного ризику.

РОЗДІЛ 4
ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗМОЛОЗДАТНОСТІ БІНАРНИХ ВУГІЛЬНИХ СУМІШЕЙ

Попередні дослідження [29, 48, 55–59] показали, що показник *HGI* тісно пов'язаний з потужністю витрат на подрібнення вугілля, та може бути використовуватись для оптимізації роботи подрібнюючих відділень вуглепідготовчих цехів на коксохімічних виробництвах.

В роботі [60] було вивчено сировинні фактори, що впливають на коефіцієнт розмолоздатності Хардгрова *(HGI)* українського та імпортного вугілля. Виявлено, що показник *HGI* залежить від вмісту вуглецю та ступеня впорядкованості структури органічної маси вугілля та зростає зі зростанням показника відображення вітриніту та температури загоряння, а також зниженням виходу летких речовин вугілля. Також показано, що найбільші значення коефіцієнтів кореляції (r>0,8) встановлені між коефіцієнтом розмолоздатності Хардгрова і показниками $t_{зв}$, V^{daf}, R_0, C^{daf}, O_d^{daf}, δ и C_{ap}, які характеризують склад, будову і властивості *ОМВ*.

З метою визначення, чи є коефіцієнт розмолоздатності Хардгрова адитивним показником для вугільних сумішей, скористалися методичним підходом, використаним у роботі [61].

В ході виконання досліджень визначали показники коефіцієнтів розмолоздатності по Хардгрову бінарних сумішей вугілля у плаваючому процентному співвідношенні (від 0 до 100 %), що складалися з різного ступеня метаморфізму вугілля марок «Г», «Ж», «К» і «ПС».

У табл. 4.1-4.4 наведено значення показників технологічного *(W^a, A^d, S^d_t, V^{daf})*, пластометричного *(x, y)*, петрографічного *(R_0, Vt, Sv, I, L, ΣОК,* рефлектограма вітриніту), елементного *(C^{daf}, H^{daf}, N^{daf}, S^d_t, O^{daf}_d)* та гранулометричного (>50; 25-50; 13-25; 6-13; 3-6; 1-3; 0,5-1; <0,5 мм) аналізів досліджених зразків вугілля.

Таблиця 4.1

Технологічні властивості вугілля

Постачальник, країна	Марка	Технічний аналіз, %			Пластометричні показники, мм		Коефіцієнт розмолоздатності по Хардгрову, од.	Показник окиснення, °С
		A^d	S^d_t	V^{daf}	x	y	HGI	Δt
ЦЗФ «Жовтнева», Україна	Г	7,2	1,32	38,6	42	11	38	1
Wellmore, США	Ж	7,4	1,02	32,9	23	22	63	4
ЗФ «Свято-Варваринська», Україна	К	8,2	0,72	26,9	15	15	67	4
Pocahontas, США	ПС	7,9	0,71	18,7	11	12	83	1

У цьому дослідженні вивчали українське вугілля двох марок – марка «Г» (ЦЗФ «Жовтнева») та марка «К» (ЗФ «Свято-Варваринська»), а також двох марок американського вугілля – марки «Ж» і «ПС» (Wellmore та Pocahontas відповідно), що використовується в якості сировини на коксохімічних підприємствах Україні.

Аналізуючи дані, представлені в таблицях 4.1-4.4, можна сказати, що вугілля, яке використовувалося в дослідженні, відповідає заявленим маркам.

Таблиця 4.2

Петрографічна характеристика вугілля

Постачальник, країна	Марка	Петрографічний склад (без мінеральних домішок),%					Середній показник відбиття вітриніту, %	Стадії метаморфізму вітриніту, %					
								0,50-0,79	0,80-0,89	0,90-1,19	1,20-1,49	1,50-1,69	1,70-2,59
								Марки вугілля, що умовно відповідають стадіям метаморфізму вітриніту.					
		Vt	*Sv*	*I*	*L*	*∑OK*	R_o	ДГ+Г	ГЖО+ГЖ	Ж	К	ПС	П
ЦЗФ «Жовтненева», Україна	Г	63	0	26	11	26	0,72	95	5	0	0	0	0
Wellmore, США	Ж	83	0	13	4	13	0,99	2	10	88	0	0	0
ЗФ «Свято-Варваринська», Україна	Ж	86	1	12	1	13	1,20	0	0	50	50	0	0
Pocahontas, США	К	69	1	30	0	31	1,51	0	0	0	45	53	2

Таблиця 4.3

Елементній склад вугілля

Постачальник, країна	Марка	Елементний склад, %				
		C^{daf}	H^{daf}	N^{daf}	S_t^d	O_d^{daf}
ЦЗФ «Жовтненева», Україна	Г	82,75	5,64	1,29	1,32	9,00
Wellmore, США	Ж	83,04	5,52	1,63	1,02	8,79
ЗФ «Свято-Варваринська», Україна	К	86,13	5,09	1,60	0,72	6,46
Pocahontas, США	ОС	88,90	4,82	1,72	0,71	3,85

Таблиця 4.4

Гранулометричний склад і середній діаметр вугілля

Постачаль-ник, країна	Марка	Гранулометричний склад (мм), %									Середній діаметр частинок, мм
		>50	50–25	13–25	6–13	3–6	1–3	0,5–1	<0,5	<3	d_s
ЦЗФ «Жовтнева», Україна	Г	0	9,3	17,8	18,2	15,9	20,6	8,9	9,3	38,8	9,80
Wellmore, США	Ж	0	3,9	9,0	22,6	14,1	19,5	12,1	18,8	50,4	6,48
ЗФ «Свято-Варваринська», Україна	К	0	8,1	7,3	16,9	17,7	17,7	8,1	24,2	50,0	7,29
Pocahontas, США	ОС	0	0	3,2	7,3	8,3	23,8	23,2	34,2	81,2	2,41

На даний час, найбільшого поширення на Українських коксохімічних підприємствах, незважаючи на всю різноманітність прийомів, набули звичайні та диференційовані схеми остаточного подрібнення вугілля для коксування [105]. При традиційному способі вся маса шихти подрібнюється в одному агрегаті. За схемою дроблення шихти (*ДШ*) вугілля окремих шихтогруп подається до бункера дозувального відділення. Потім формується шихта, яка згодом подається до відділення остаточного дроблення де відбувається її подрібнення до регламентованого вмісту класу 0-3 мм. За схемою *ДДК* (диференційоване дроблення компонентів) кожен компонент шихти дробиться окремо, або ж група компонентів у випадку застосування схеми *ГДК* (групове дроблення компонентів). Залежно від міцності вугілля встановлюється режим його дроблення, чим забезпечується зменшення переподрібнюваного матеріалу.

З метою дослідження впливу способів підготовки вугільної шихти на величину її подрібнюваності, складали бінарні вугільні суміші з різним ступенем метаморфізму вугілля. Для імітації використання різних методів підготовки вугільної шихти перед коксуванням, суміші складали двома способами:

1. За роздільної підготовки *($HGI_{факт,\ 1}$, од.),* кожен із двох компонентів вугільної суміші окремо подрібнювався до вмісту 100 % класу 0,6-1,2мм [8, 34], після чого їх з'єднували відповідно до їхньої дольової участі в суміші. Даний метод імітує застосування схеми диференційованого дроблення компонентів (*ДДК*).

2. За спільної підготовки *($HGI_{факт,\ 2}$, од.),* компоненти вугільної суміші відповідно з'єднували до їх дольової участі, після чого цю суміш подрібнювали до 100% вмісту класу 0,6-1,2 мм. Цей спосіб імітує застосування схеми дроблення шихти (*ДШ*).

Принципові схеми зазначених схем підготовки вугільної шихти наведено на рис. 4.1.

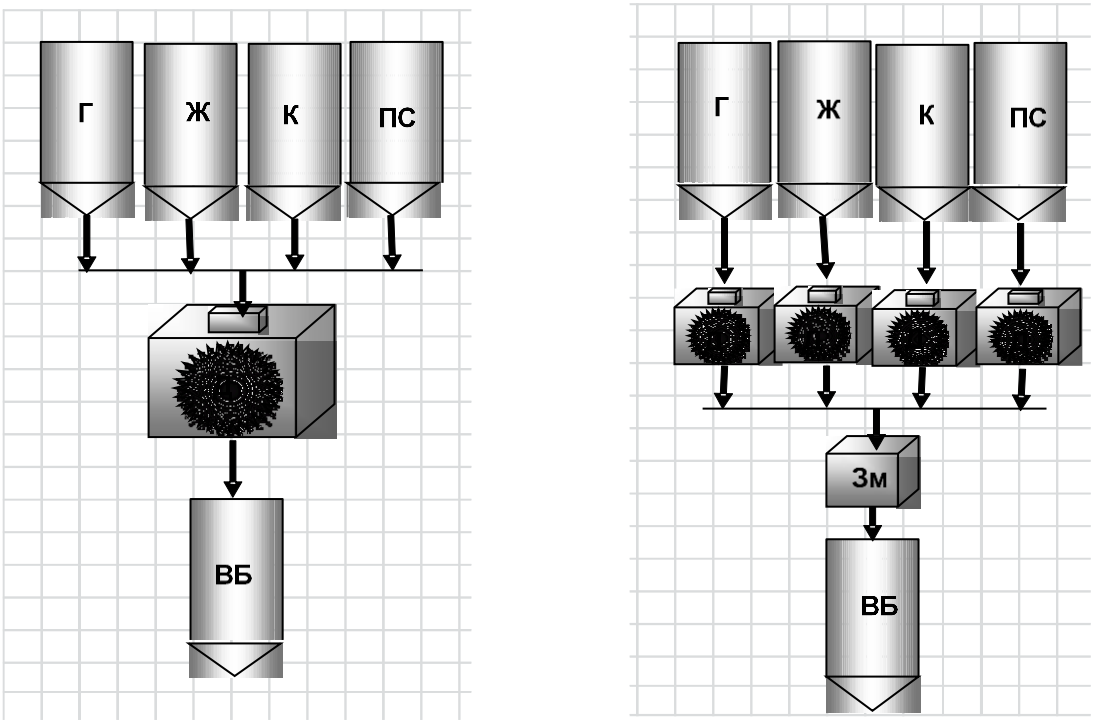


Рис. 4.1. – Схеми дроблення вугілля: а) *ДШ*; б) *ДДК* (*Г, Ж, К, ПС* – марки вугілля; Д-дроблення; Зм-змішування; ВБ-вугільна башта.)

Таким чином, підготовкою зразків для визначення їх коефіцієнтів розмолоздатності, виробнича схема *ДШ* моделюється спільною підготовкою, а схема *ДДК* (*ГДК*) –роздільною.

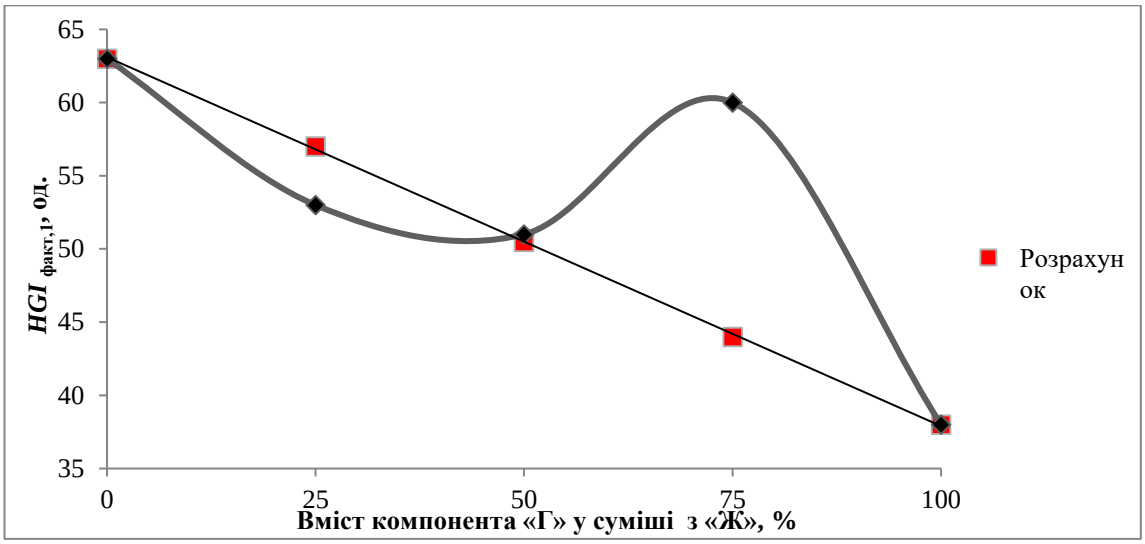
Фактичні та розрахункові (за методом адитивності) значення коефіцієнтів розмолоздатності бінарних вугільних сумішей представлені в табл. 4.5, а також у вигляді графічних залежностей на рис. 4.2-4.7.

Аналізуючи дані, наведені у табл. 4.5, можна констатувати, що мінімальні та максимальні значення коефіцієнта розмоздатності по Хардгрову, як розраховані за адитивністю, так і визначені двома різними способами, характеризуються однаковими величинами, а саме: 38 та 83 од.

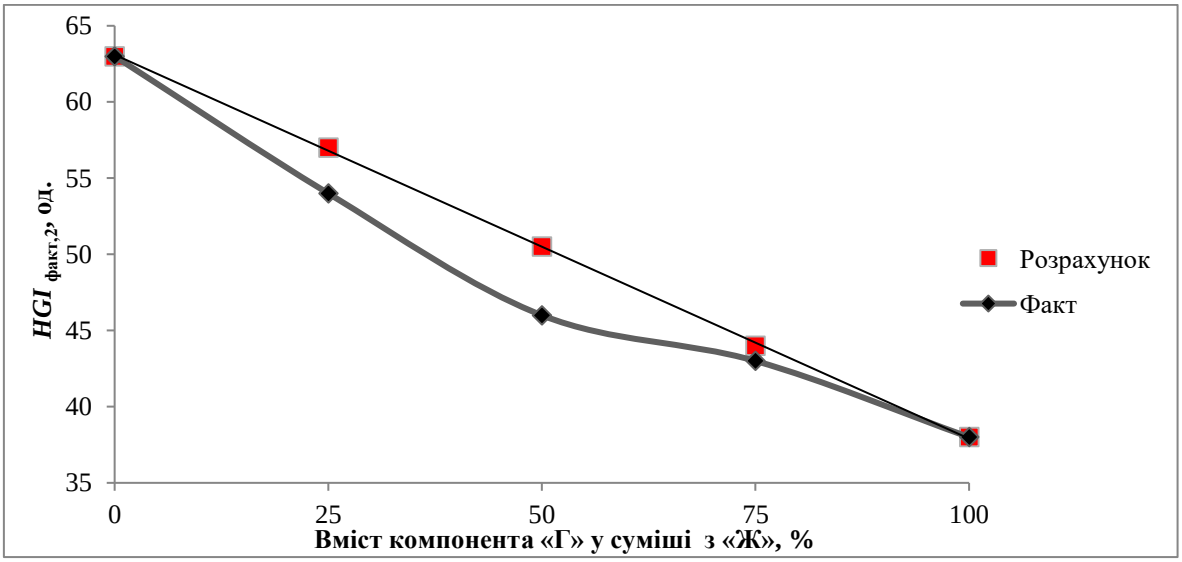
Таблиця 4.5

Фактичні та розрахункові значення *HGI* бінарних вугільних сумішей

№ досліду	Склад суміші, %	Коефіцієнт розмолоздатності по Хардгрову, од.		
		$HGI_{розр.}$	$HGI_{факт,\ 1}$	$HGI_{факт,\ 2}$
1	**Г** (0) + Ж **(**100)	63	63	63
2	**Г** (25) + **Ж(**75)	57	53	54
3	**Г** (50) + **Ж (**50)	50,5	51	46
4	**Г** (75) + **Ж** (25)	44	60	43
5	**Г** (100) + **Ж** (0)	38	38	38
6	**Г** (0) + **К** (100)	67	67	67
7	**Г** (25) + **К** (75)	60	59	55
8	**Г** (50) + **К** (50)	52,5	52	45
9	**Г** (75) + **К** (25)	45	51	43
10	**Г** (100) + **К** (0)	38	38	38
11	**Г** (0) + **ПС** (100)	83	83	83
12	**Г** (25) + **ПС** (75)	72	79	69
13	**Г** (50) + **ПС** (50)	60,5	62	50
14	**Г** (75) + **ПС** (25)	49	54	48
15	**Г** (100) + **ПС** (0)	38	38	38
16	**Ж** (0) + **К** (100)	67	67	67
17	**Ж** (25) + **К** (75)	66	66	64
18	**Ж** (50) + **К** (50)	65	65	64
19	**Ж** (75) + **К** (25)	64	63	60
20	**Ж** (100) + **К** (0)	63	63	63
21	**Ж** (0) + **ПС** (100)	83	83	83
22	**Ж** (25) + **ПС** (75)	79	83	79
23	**Ж** (50) + **ПС** (50)	73,5	71	75
24	**Ж** (75) + **ПС** (25)	68	74	66
25	**Ж** (100) + **ПС** (0)	63	63	63
26	**К** (0) + **ПС** (100)	83	83	83
27	**К** (25) + **ПС** (75)	80	83	80
28	**К** (50) + **ПС** (50)	75,5	82	71
29	**К** (75) + **ПС** (25)	71	75	71
30	**К** (100) + **ПС** (0)	67	67	67
Мінімум		38	38	38
Максимум		83	83	83



а)



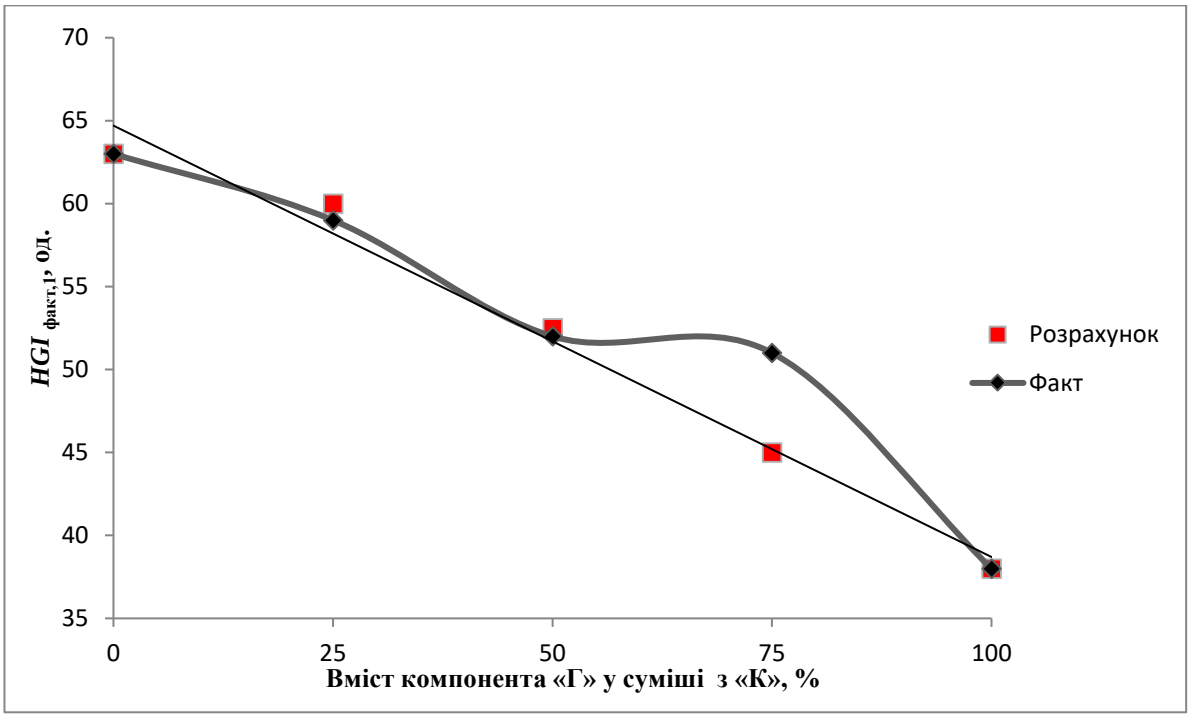
а)

б)

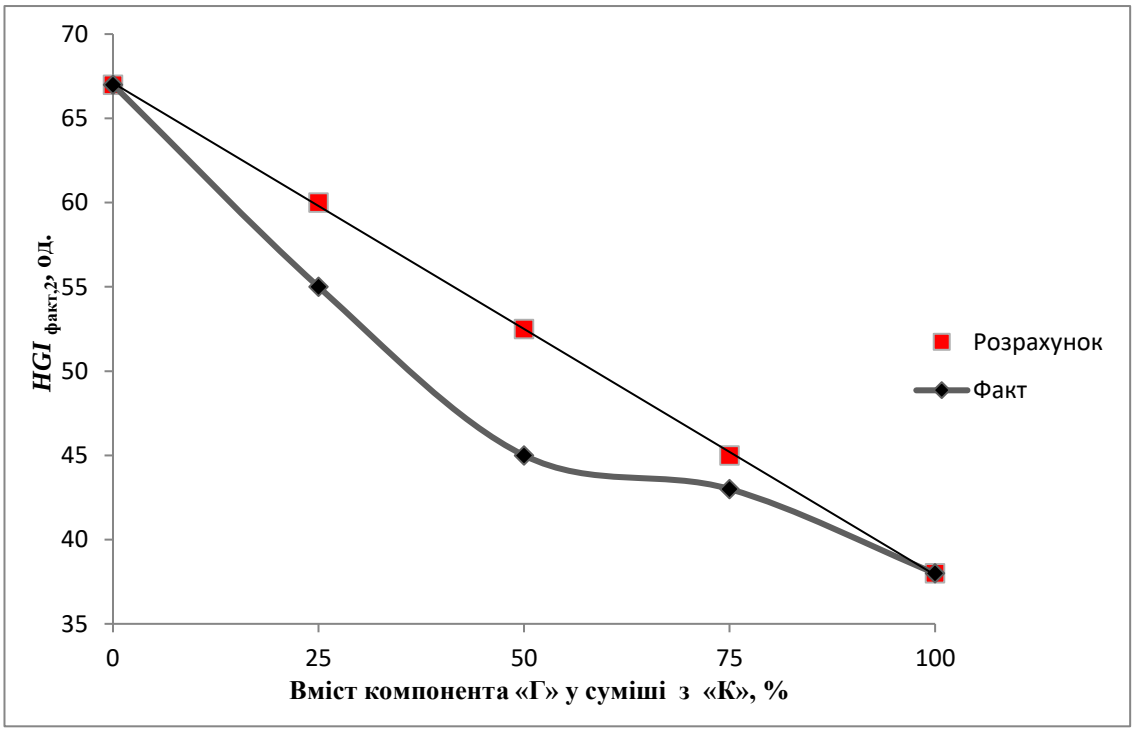
а) за роздільної підготовки бінарних проб;

б) за спільної підготовки бінарних проб

Рис. 4.2 – Фактичні та розрахункові значення коефіцієнтів *HGI* суміші вугілля марок «Г» і «Ж»



а)

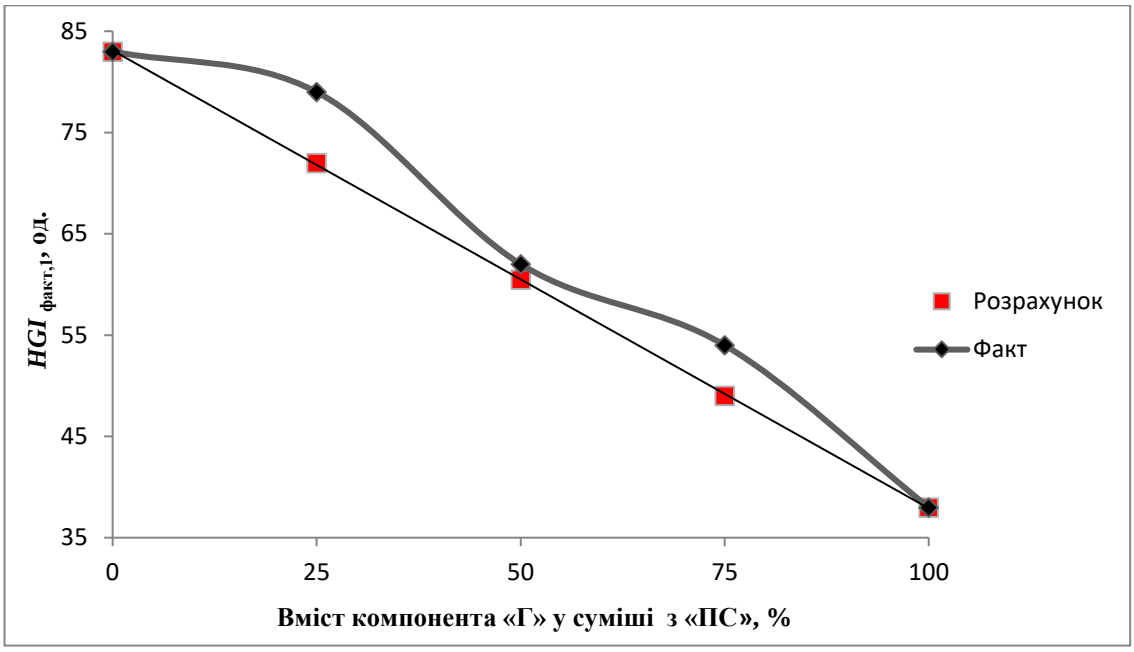


б)

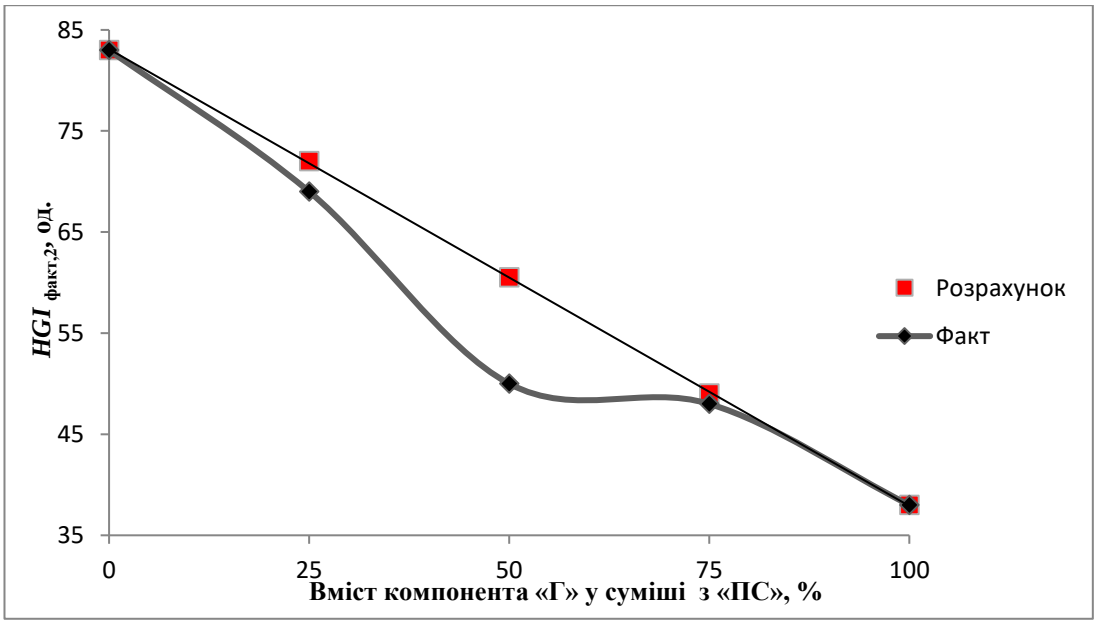
а) за роздільної підготовки бінарних проб;

б) за спільної підготовки бінарних проб

Рис. 4.3 – Фактичні та розрахункові значення коефіцієнтів *HGI* суміші вугілля марок «Г» і «К»



а)

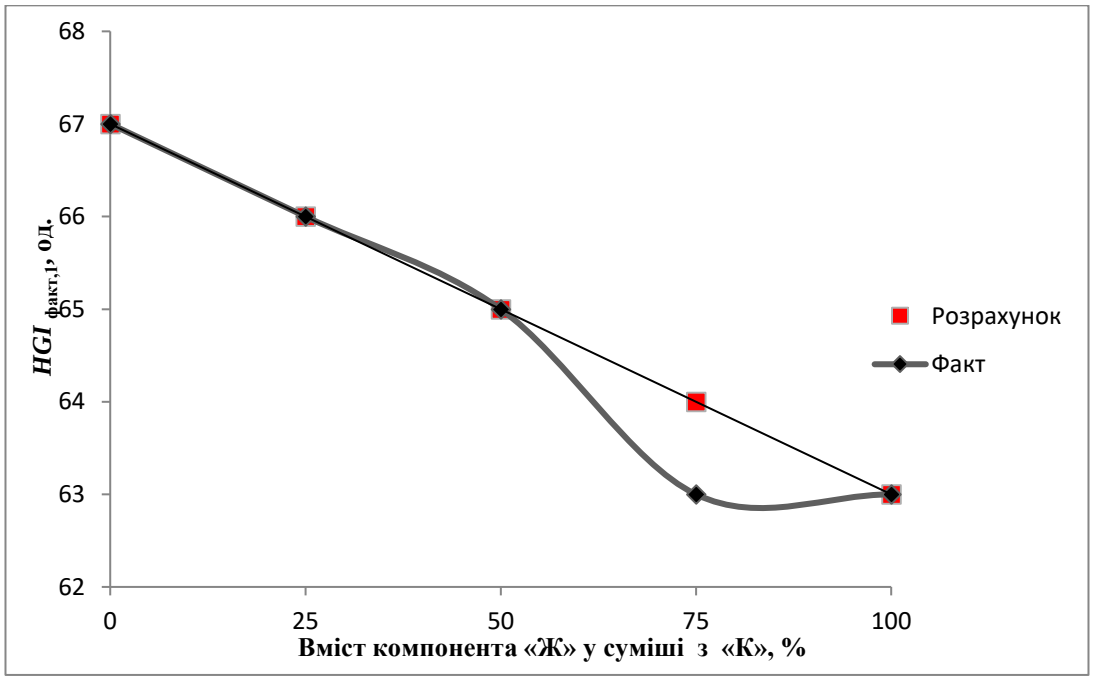


б)

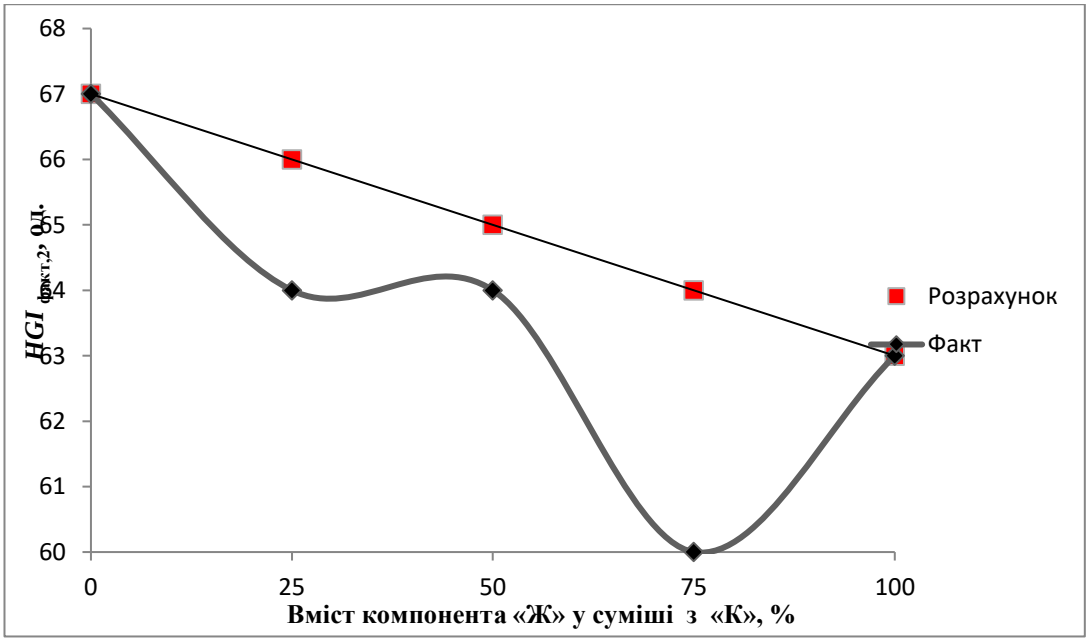
а) за роздільної підготовки бінарних проб;

б) за спільної підготовки бінарних проб

Рис. 4.4 – Фактичні та розрахункові значення коефіцієнтів *HGI* суміші вугілля марок «Г» і «ПС»



а)

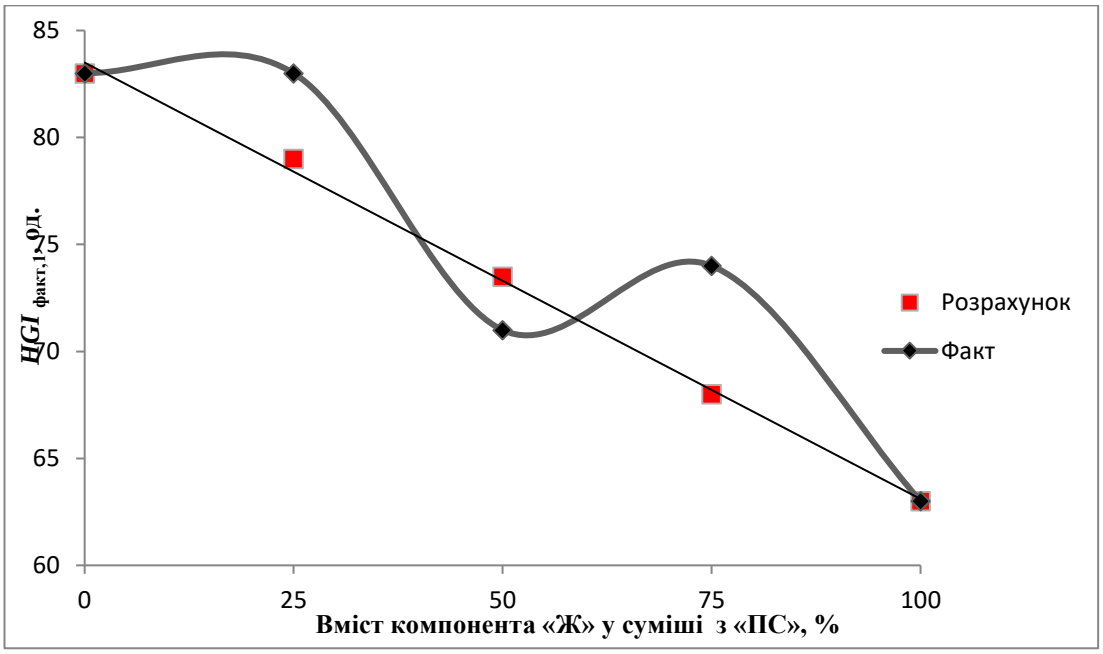


б)

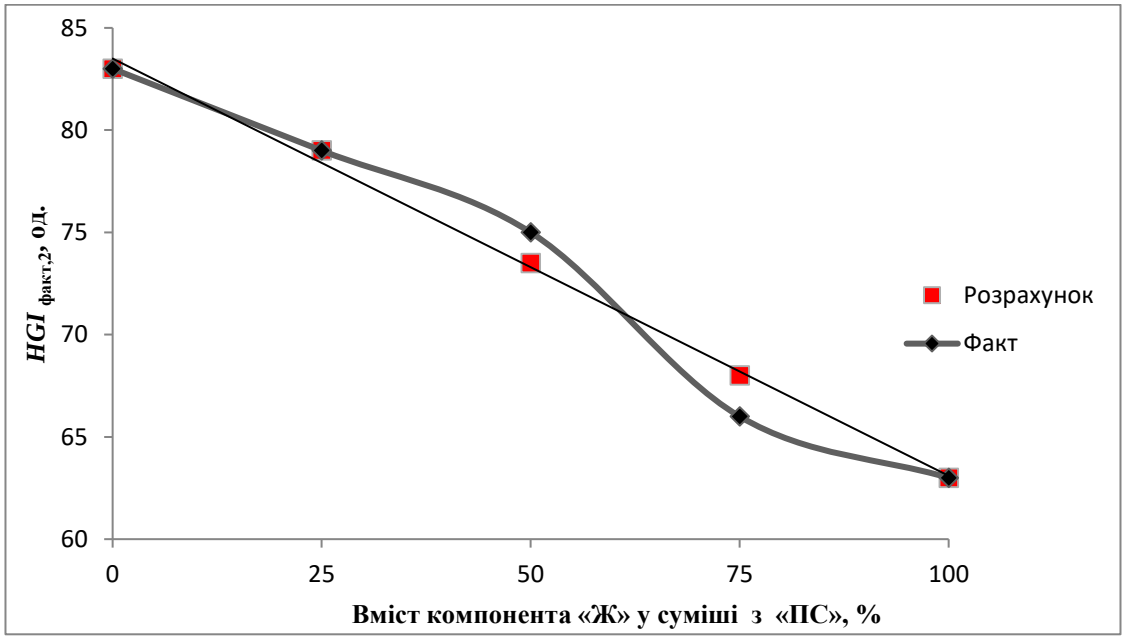
а) за роздільної підготовки бінарних проб;

б) за спільної підготовки бінарних проб

Рис. 4.5 – Фактичні та розрахункові значення коефіцієнтів *HGI* суміші вугілля марок «Ж» і «К»



а)

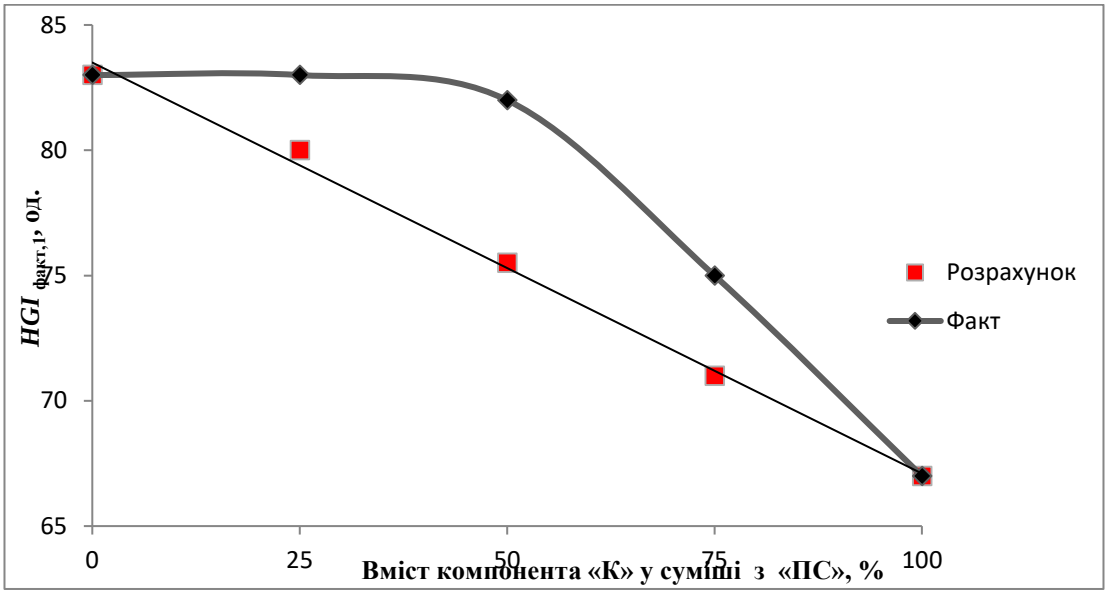


б)

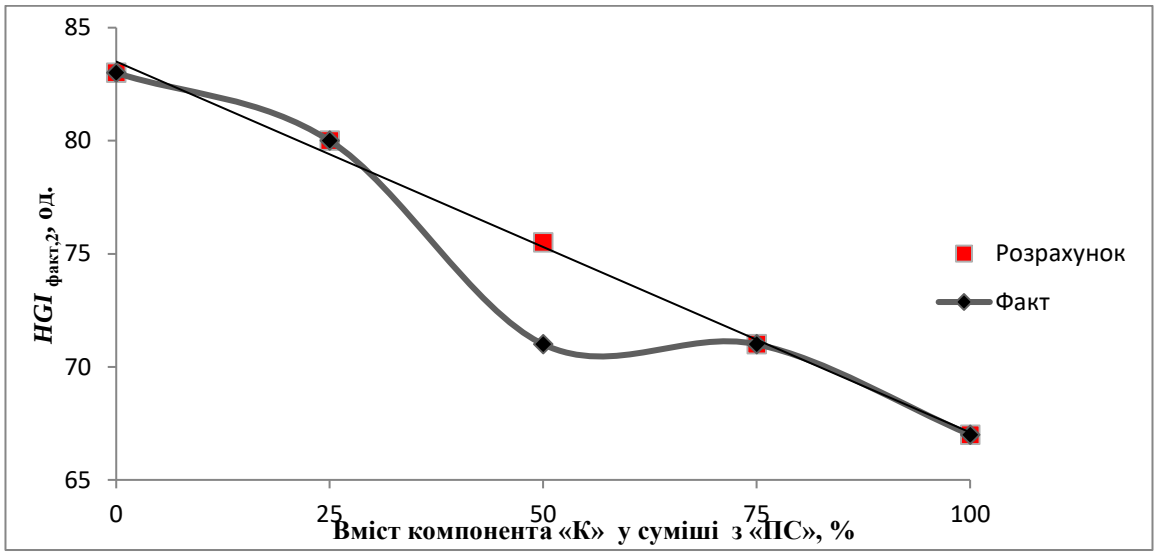
а) за роздільної підготовки бінарних проб;

б) спільної підготовки бінарних проб

Рис. 4.6 – Фактичні та розрахункові значення коефіцієнтів *HGI* суміші вугілля марок марок «Ж» і «ПС»



а)



б)

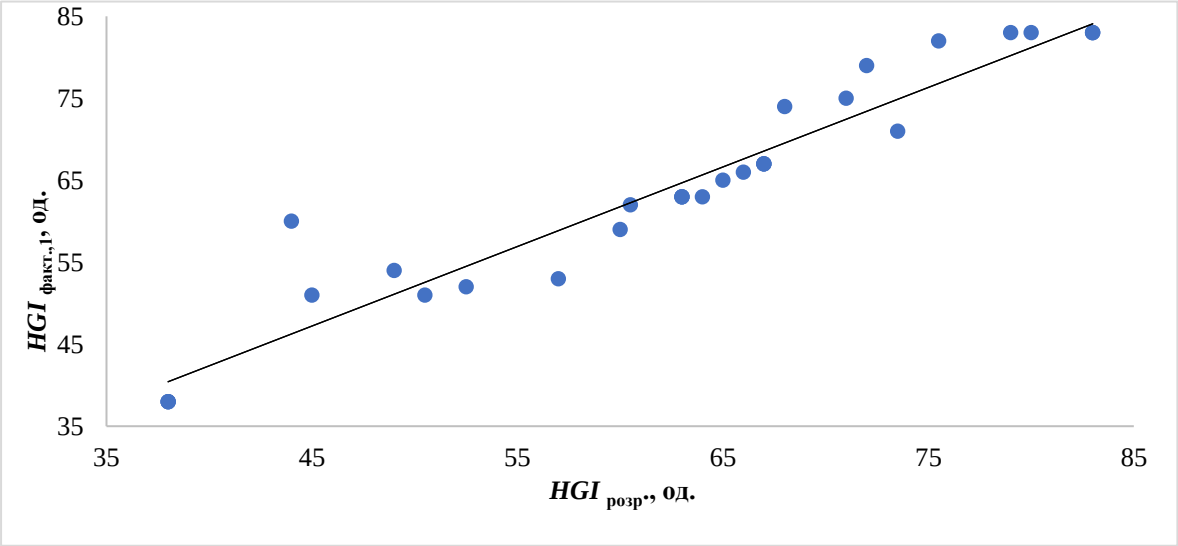
а) за роздільної підготовки бінарних проб;

б) за спільної підготовки бінарних проб

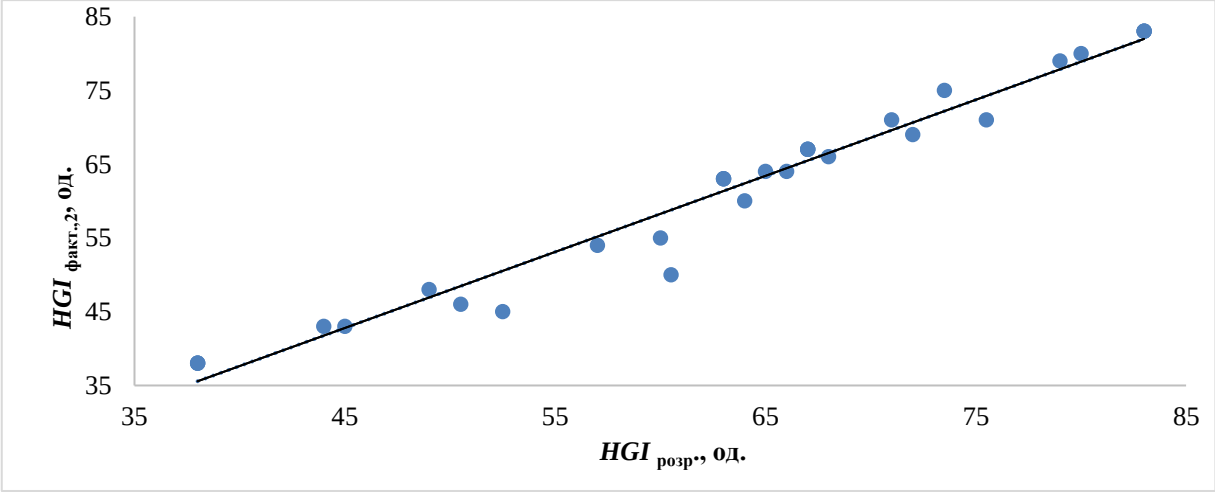
Рис. 4.7 – Фактичні та розрахункові значення коефіцієнтів *HGI* суміші вугілля марок «К» і «ПС»

З форми графічних залежностей, наведених на рис. 4.2-4.7 можна стверджувати, що за спільної підготовки бінарної вугільної суміші, коефіцієнт її розмолоздатності прагне до значення *HGI* твердішого компонента.

При роздільній підготовці вугільних концентратів ситуація менш однозначна, проте, здебільшого, величина *HGI* суміші перевищує значення, що розраховане по адитивності.



а)



б)

а) $HGI_{факт.,1}$; б) $HGI_{факт.,2}$.

Рис. 4.8 – Графічна залежність між $HGI_{розр.}$ и $HGI_{факт}$

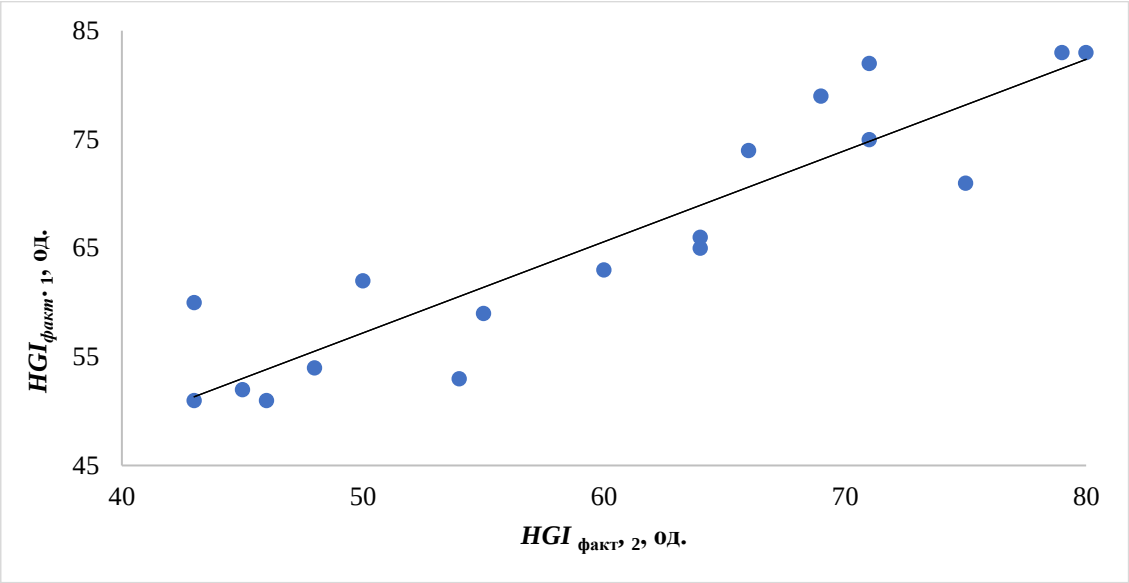


Рис. 4.9 – Графічна залежність між $HGI_{факт.,1}$ и $HGI_{факт.,2}$.

Графічні залежності між зазначеними у табл. 4.5 фактичними та розрахунковими значеннями коефіцієнта розмолоздатності по Хардгрову наведено на рис. 4.8 та 4.9, а їх математичний опис у табл. 4.6.

Таблиця 4.6

Математичні залежності та їх статистична оцінка

№ залежності	Вид залежності	Статистична оцінка[3]		
		r	*D, %*	*σ, од.*
(4.1)	$HGI_{факт,1} = 0{,}9702 \cdot HGI_{розр} + 3{,}5532$	0,960	92,2	13,4080
(4.2)	$HG\ I_{факт,2} = 1{,}0313 \cdot HGI_{розр} - 3{,}6162$	0,983	96,6	13,6676
(4.3)	$HGI_{факт,2} = 0{,}839 \cdot HGI_{факт,1} + 15{,}245$	0,918	84,2	12,0183

Аналіз залежностей та їх статистична оцінка вказує на те, що отримані досліджені взаємозв'язки характеризуються високими значеннями коефіцієнтів кореляції (0,918-0,983) і детермінації (84,2 %-96,6 %), що вказує

[3] r – коефіцієнт множинної кореляції; D – коефіцієнт детермінації, %, σ – середнє квадратичне відхилення, од.

на можливість задовільно прогнозувати коефіцієнти розмолоздатності бінарної суміші спираючись на визначення коефіцієнтів розмолоздатності вугільних компонентів, що входять до неї.

Аналіз залежностей (4.1) і (4.2) підтверджує та дає кількісну оцінку висловленому раніше твердженню, що значення коефіцієнтів *HGI* суміші, за роздільної підготовки її вугільних компонентів, в середньому на 3,6 од., перевищує розрахункове значення. Натомість, за спільної підготовки – у середньому на 3,6 од. менше за розрахункове значення.

Практичний висновок, що можна зробити виходячи з цього, – подрібнення вугілля за промисловою схемою *ДШ* вимагає більших витрат енергії на дроблення порівняно зі схемою *ГДК* або *ДДК*. З іншого боку, використання схеми *ГДК (ДДК)* вимагає набагато більших вкладень з точки зору початкових витрат на її впровадження (придбання та експлуатація додаткового подрібнюючого обладнання), що, з економічної точки зору, і зумовлює вибір тієї або іншої схеми підготовки вугільної шихти.

ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 4

1. Визначено коефіцієнти розмолоздатності *HGI* бінарних сумішей вугілля, що складалися з вугілля різного ступеня метаморфізму у відсотковому співвідношенні, що змінюється.

2. Виявлено наявність систематичних відхилень значень коефіцієнтів розмолоздатності *HGI* фактичних сумішей при їх спільній підготовці від розрахованих за правилом адитивності.

3. Розроблено математичні залежності, що дають змогу за визначеними результатами коефіцієнта розмолоздатності окремих компонентів вугілля прогнозувати величину *HGI* вугільної суміші.

4. Встановлено, що значення *HGI* бінарної вугільної суміші за роздільної підготовки вугільних компонентів, перевищує розрахункове значення (у середньому на 3,6 од.), а при спільній підготовці – менше розрахункового значення (у середньому на 3,6 од.).

5. Показано, що подрібнення вугілля за схемою *ДШ* потребує порівняно більших витрат енергії на дроблення порівняно зі схемою *ДДК*.

РОЗДІЛ 5
ПРОГНОЗ РОЗРАХУНКУ КОЕФІЦІЄНТУ РОЗМОЛОЗДАТНОСТІ ВУГІЛЬНИХ ШИХТ

5.1 Формулювання основних принципів визначення розмолоздатності реальних промислових вугільних шихт основних коксохімічних підприємств України методом Хардгрова.

Раніше нами було вивчено [60] сировинні фактори, що впливають на коефіцієнт розмолоздатності за Хардгровим (*HGI*) українського та імпортного вугілля. Виявлено, що показник *HGI* залежить від вмісту вуглецю та ступеня впорядкованості структури органічної маси вугілля та збільшується зі зростанням показника відображення вітриніту та температури загоряння, а також зниженням виходу летких речовин вугілля. Також показано [48], що найбільші значення коефіцієнтів кореляції (r>0,8) встановлені між коефіцієнтом розмолоздатності по Хардгрову та показниками $t_{зв}$, V^{daf}, R_0, C^{daf}, O_d^{daf}, δ та C_{ap}, які характеризують склад, будову та властивості *OMB*. Визначено також коефіцієнти розмолоздатності *HGI* бінарних сумішей вугілля, до складу яких входило вугілля різних стадій метаморфізму основних чотирьох марок у відсотковому співвідношенні, що змінюється. Виявлено наявність систематичних відхилень фактичних значень коефіцієнтів розмолоздатності *HGI* сумішей від розрахованих за правилом адитивності. Встановлено математичну залежність, яка дозволяє за встановленими значеннями коефіцієнтів розмолоздатності *HGI* окремих компонентів прогнозувати значення коефіцієнта розмолоздатності в бінарній суміші [62].

У статті [63] показано, що показник міцності Протод'яконова *f* взаємопов'язаний з багатьма основними показниками якості вугілля, як то: ступенем метаморфізму, що виражається показником відбиття вітриніту, петрографічним, мінеральним та елементним складами, а також з показником розмолоздатності по Хардгрову.

В роботі [64] обґрунтовано проблеми та важливість визначення показника якості твердих горючих копалин (ТГК), такого як механічна міцність. Показано, що цей показник є залежним від ряду факторів (в’язкість, тріщинуватість, крихкість, структурні властивості зв’язків, тощо), всю зміну котрих врахувати неможливо. Показано, що оцінку міцнісних властивостей вугілля слід здійснювати спираючись на масові випробування із використанням статистичних методів, які дозволяють розрахувати середні значення і варіаційні коефіцієнти. Лабораторні методи механічних випробувань зразків гірських порід з точки зору їх розробленості, здебільшого є доступнішими і високо достовірними порівняно з натурними (за умови якісного проведення випробувань).

Також у статті розглянуто основні фізико-механічні характеристики з точки зору промислової переробки ТГК, наведено основні методи вимірювання їх механічної міцності та обладнання, що використовується для цього. Зазначено основні недоліки та переваги цих методів, а також їх взаємозв'язок. Наведено фактори найсуттєвішого впливу на показники механічної міцності вугілля. Також дано оцінку доцільності застосування існуючих методів з огляду на інформативність показників міцності матеріалу по відношенню до сфери його застосування. Більш детально розглянуто найпоширеніші у вуглепереробній галузі методи.

Наразі найбільш розповсюдженим, інформативним та універсальним залишається метод визначення розмолоздатності Хардгрова [8]. Тому практичний інтерес представляє формулювання основних принципів визначення механічної міцності реальних промислових вугільних шихт вищезазначеним методом. Були взяті в якості об’єкта дослідження затверджені фактичні вугільні шихти основних коксохімічних підприємств України на момент проведення експерименту (січень 2022 р.). Компоненти шихт були розподілені за марками вугілля, кожна марка, своєю чергою, була представлена одним типовим її компонентом, участь у шихті якого є найбільшою. Таким чином, компоненти марки «Г» (ЗФ «Талдинська-Західна»

та ВР «Талдинський») представлені вугіллям ЗФ «Талдинська-Західна»; компоненти марки «Ж» (ш. «Центральна» ДП «Торецьке», ш. «Центральна» ДП «Мирноградвугілля», ш. «Краснолиманська», ЗФ «Кузнецька» ш. «Ерунаківська-8», Wellmore, Carter Roag, Clintwood Jod) представлені вугіллям Wellmore; марка «К» представлена одним вугіллям ЗФ «Свято-Варваринська»; компоненти марки «ПС» (Pocahontas та ЗФ «Міжреченська») представлені вугіллям Pocahontas.

Досліджені концентрати вугілля були піддані технічному (A^d, S^d_t, V^{daf}), пластометричному (x, y), петрографічному (R_0, Vt, Sv, I, L, ΣOK, рефлектограма вітриніту), елементному (C^{daf}, H^{daf}, N^{daf}, S_t^d, O_d^{daf}) та гранулометричному (>13; 3–13; 1–3; 0,5–1; <0,5 мм) аналізам. Крім того, було визначені також показники окиснення даного вугілля. Результати досліджень наведені в табл. 5.1–5.4.

Таблиця 5.1

Технологічні властивості дослідженого вугілля

Постачальник	Марка	Технічний аналіз, %			Пластометричні показники, мм		Показник окиснення, °С	Коефіцієнт розмолоздатності по Хардгрову, од
		A^d	S^d_t	V^{daf}	x	y	Δt	HGI
ЗФ «Талдинська-Західна»	Г	6,9	0,46	38,9	46	13	2,0	47
Wellmore	Ж	8,4	0,96	31,0	15	23	5,1	64
ЗФ «Свято-Варваринська»	К	7,2	0,70	26,0	21	14	1,0	70
Pocahontas	ПС	7,9	0,75	16,4	11	11	3,8	88

Таблиця 5.2

Петрографічна характеристика дослідженого вугілля

Постача-льник	Мар-ка	Петрографічний склад (без мінеральних домішок),%					Середній довільний показ-ник відбиття Вітриніту,%	Стадії метаморфізму вітриніту,%					
								0,50 –0,79	0,80–0,89	0,90–1,19	1,20 – 1,49	1,50–1,69	1,70 – 2,59
								Марки вугілля, умовно відповідні стадіям метаморфізму вітриніту					
		Vt	*Sv*	*I*	*L*	*ΣПК*	R_0	ДГ+Г	ГЖП+ГЖ	Ж	К	ПС	П
ЗФ «Талдинська-Західна»	Г	77	0	22	1	22	0,66	100	0	0	0	0	0
Wellmore	Ж	82	0	17	1	17	1,00	1	15	83	1	0	0
ЗФ «Свято-Варваринска»	К	90	0	9	1	9	1,22	0	0	44	56	0	0
Pocahontas	ПС	67	0	33	0	33	1,65	0	0	1	6	56	37

Таблиця 5.3

Елементний склад дослідженого вугілля

Постачальник	Марка	Елементний склад (сухий, беззольний стан), %				
		C^{daf}	H^{daf}	N^{daf}	S_t^d	O_d^{daf}
ЗФ «Талдинська-Західна»	Г	82,05	5,50	2,38	0,46	9,61
Wellmore	Ж	87,06	5,34	1,73	0,96	4,91
ЗФ «Свято-Варваринська»	К	88,57	5,18	2,05	0,70	3,50
Pocahontas	ПС	90,19	4,75	1,36	0,75	2,95

Таблиця 5.4

Гранулометричний склад та насипна щільність дослідженого вугілля

Постачальник	Мар-ка	Гранулометричний склад (мм), %									Середній діаметр частинок, мм	Насипна щільність, кг/дм^3
		>50	50–25	13–25	6–13	3–6	1–3	0,5–1	<0,5	<3,0	d_s	$BD^r_{ГМ}$
ЗФ «Талдинська-Західна»	Г	0	19,2	21,7	21,0	13,0	10,4	4,4	10,3	25,1	14,17	0,862
Wellmore	Ж	1,0	6,1	12,8	22,4	17,7	16,0	6,2	17,8	40,0	8,81	0,846
ЗФ «Свято-Варваринська»	К	0	2,3	4,4	9,8	14,5	21,0	10,1	37,9	69,0	3,87	0,848
Pocahontas	ПС	0	2,0	3,3	6,8	10,7	23,9	12,5	40,8	77,2	3,18	0,808

Аналізуючи дані, наведені у табл. 5.1–5.4 можна констатувати, що вугілля яке використовували для досліджень відповідає заявленій марочній

приналежності. Насипну щільність визначали за методикою Геккера–Мамута [65, 66] .

У роботі [62] було показано, що роздільна підготовка ($HGI_{факт,\ 1,}$ од.) коли кожен із двох компонентів вугільної суміші окремо подрібнюється до 100% вмісту класу 0,6-1,2 мм, після чого їх з'єднують згідно їх участі в суміші, моделює о застосовується підготовквиробничу схему *ДДК*. У той час як спільна підготовка ($HG_{факт,\ 2,}$ од.), при якій компоненти вугільної суміші з'єднують відповідно до їхньої участі, після чого цю суміш подрібнюють до 100% вмісту класу 0,6-1,2 мм, моделює промислову схему підготовки *ДШ* [15].

У зв'язку з тим, що на відомих коксохімічних підприємствах України (ТОВ «МЕТІНВЕСТ») [111] повсюдна вугільних шихт за схемою *ДШ*, для проведення подальших досліджень щодо визначення значень розмолоздатності Хардгрова вугільних шихт доцільно використовувати спільну підготовку шихт.

Таким чином, для досліджень були складені шихти коксохімічних підприємств згідно даних таблиці

В складених шихтах були визначені основні показники технічного та петрографічного аналізів, що представлені у табл 5.5, 5.6.

Аналіз показників якості складених досліджених шихт вугілля показує, що вони є близькі за рівнем зольності, вмістом загальної сірки; відмінність же вмісту летких речовин та середнього довільного показника відбиття вітриніту співвідноситься зі зміною марочного складу шихт, що підтверджує правильність їх складання.

Таблиця 5.5

Марочний і компонентний склади вугільних шихт

Постачальник	Марка	Участь у шихті, %						
		ПРАТ «ЮЖ КОКС»	ПРАТ «ДКХЗ»	ПРАТ «АКХЗ» КЦ-1	ПРАТ «АКХЗ» КЦ-2	ПРАТ «АКХЗ» КЦ-4	ПРАТ МК «Азовсталь» («КХП АС»)	ПРАТ «ЗАПОРІЖ КОКС»
ЗФ «Талдинська-Західна»	Г	30	28	30	31	26	24	30
Wellmore, США	Ж	30	35	28	25	30	36	38
ЗФ «Свято-Варваринська	К	39	34	39	44	44	35	25
Pocahontas	ПС	1	3	3	0	0	5	7
Разом		100	100	100	100	100	100	100

Таблиця 5.6

Технологічні властивості досліджених шихт

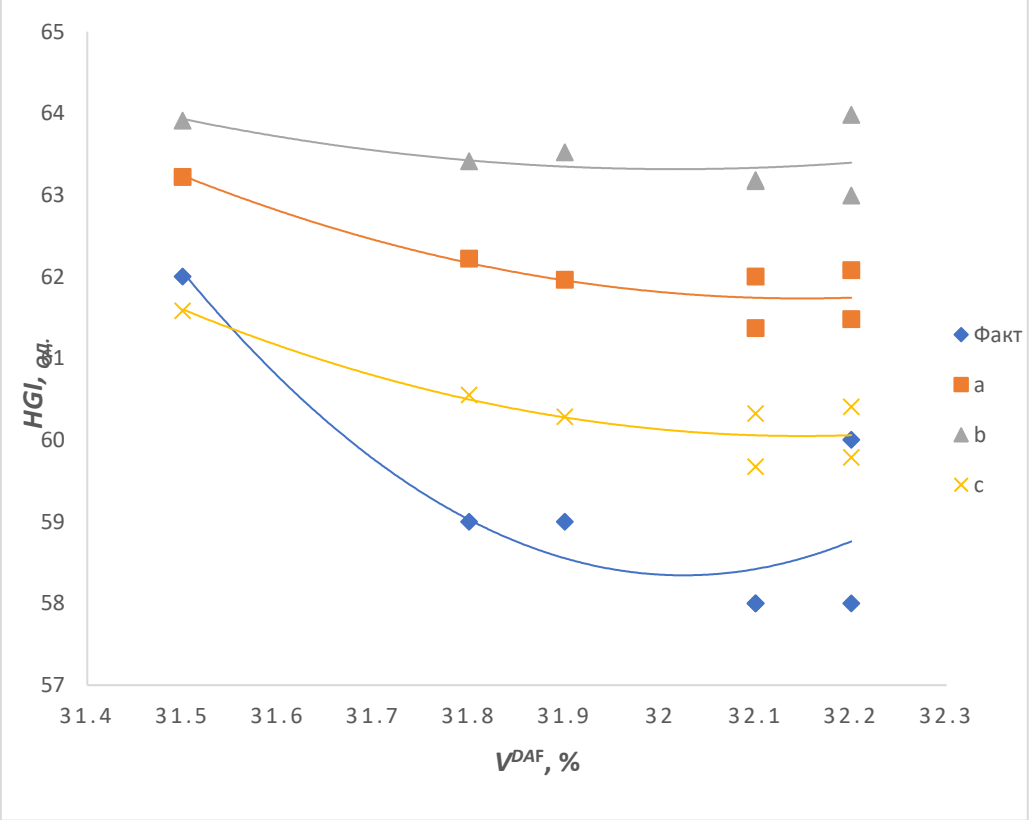
Шихта	Технічний аналіз, %			Пластометричні показники, мм		Коефіцієнт розмолоздатності по Хардгрову, од
	A^d	S^d_t	V^{daf}	x	y	HGI
ПРАТ «ЮЖКОКС»	7,6	0,73	32,2	27	16	58
ПРАТ «ДКХЗ»	7,5	0,75	32,1	26	17	58
ПРАТ «АКХЗ» КЦ-1	7,6	0,73	31,9	26	16	59
ПРАТ «АКХЗ» КЦ-2	7,6	0,71	32,1	27	16	58
ПРАТ «АКХЗ» КЦ-4	7,6	0,74	31,8	25	17	59
ПРАТ МК «Азовсталь» («КХП АС»)	7,6	0,77	31,5	25	17	62
ПРАТ «ЗАПОРІЖКОКС»	7,5	0,76	32,2	27	17	60

Таблиця 5.7

Петрографічна характеристика досліджених шихт

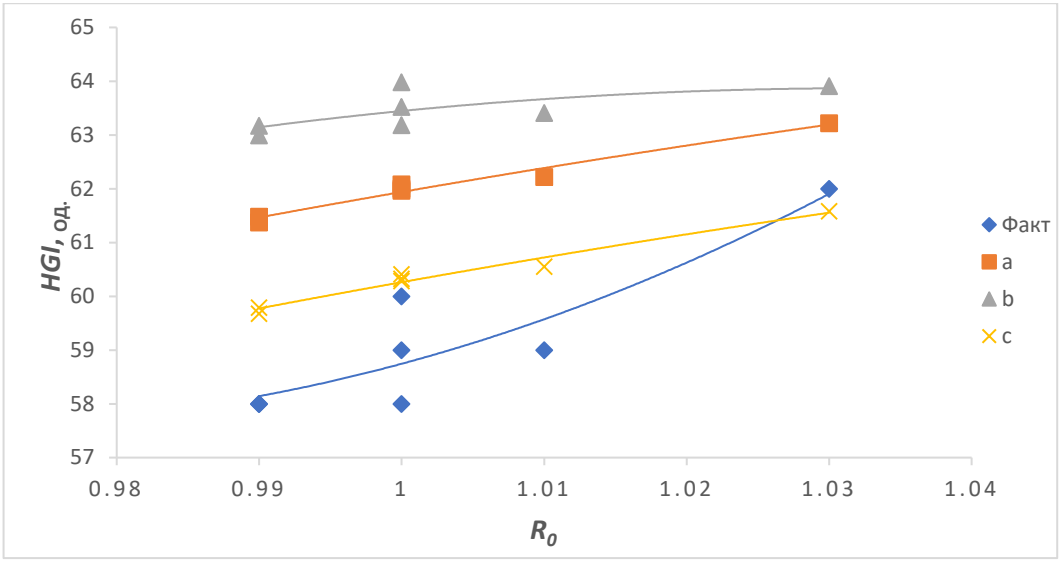
Шихта	Петрографічний склад (без мінеральних домішок),%					Середній довільний показник відбиття вітриніту, %	Стадії метаморфізму вітриніту,%					
							0,50–0,79	0,80–0,89	0,90–1,19	1,20–1,49	1,50–1,69	1,70–2,59
							Марки вугілля, умовно відповідні стадіям метаморфізму вітриніту					
	Vt	Sv	I	L	∑ПК	R_0	ДГ+Г	ГЖП+ГЖ	Ж	К	ПС	П
ПРАТ «ЮЖКОКС»	83	0	16	1	16	0,99	30	5	42	22	1	0
ПРАТ «ДКХЗ»	83	0	16	1	16	1,00	28	5	44	20	2	1
ПРАТ «АКХЗ» КЦ-1	83	0	16	1	16	1,00	30	4	40	22	2	1
ПРАТ «АКХЗ» КЦ-2	84	0	15	1	15	0,99	31	4	40	25	0	0
ПРАТ «АКХЗ» КЦ-4	84	0	15	1	15	1,01	26	5	44	25	0	0
ПРАТ МК «Азовсталь» («КХП АС»)	83	0	16	1	16	1,03	24	5	45	20	3	2
ПРАТ «ЗАПОРІЖКОКС»	81	0	18	1	18	1,00	30	6	43	15	4	3

На рис. 5.1–5.4 наведено графічні залежності коефіцієнта розмолоздатності по Хардгрову від основних показників технологічних властивостей вугілля (V^{daf}, R_0, Vt, $\sum ПК$), щільний зв'язок з якими був доведений в роботі [60].



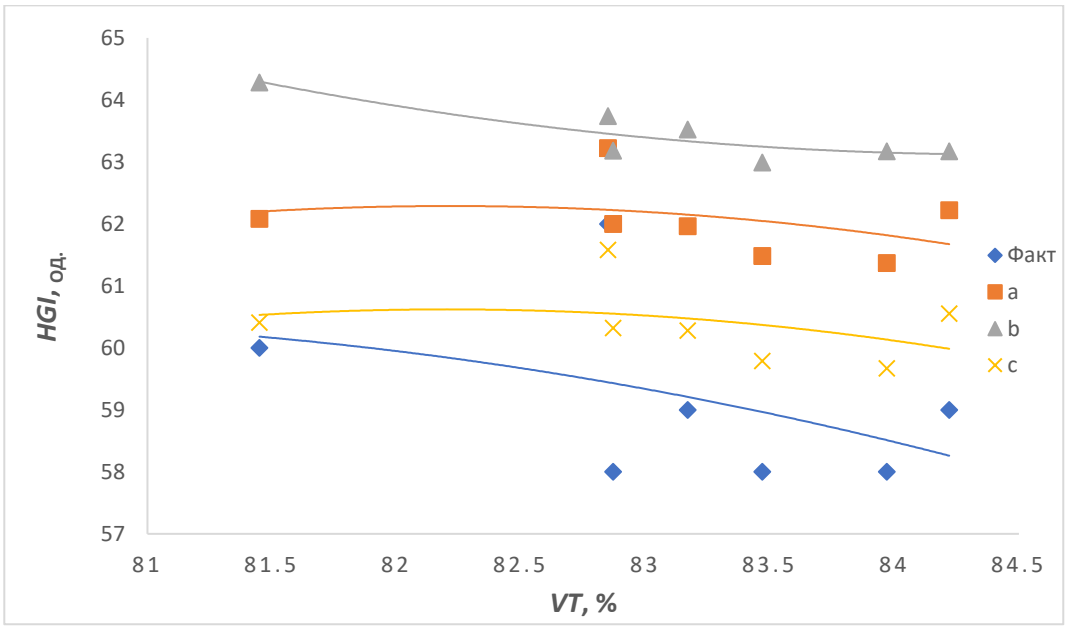
а) – розрахованого за адитивністю; б) розрахованого за формулою залежності *HGI* від V^{daf}; с) розрахованого за формулою для суміші при сумісній підготовці проб від V^{daf} шихти

Рис. 5.1. – Графік залежності *HGI* (фактичного)



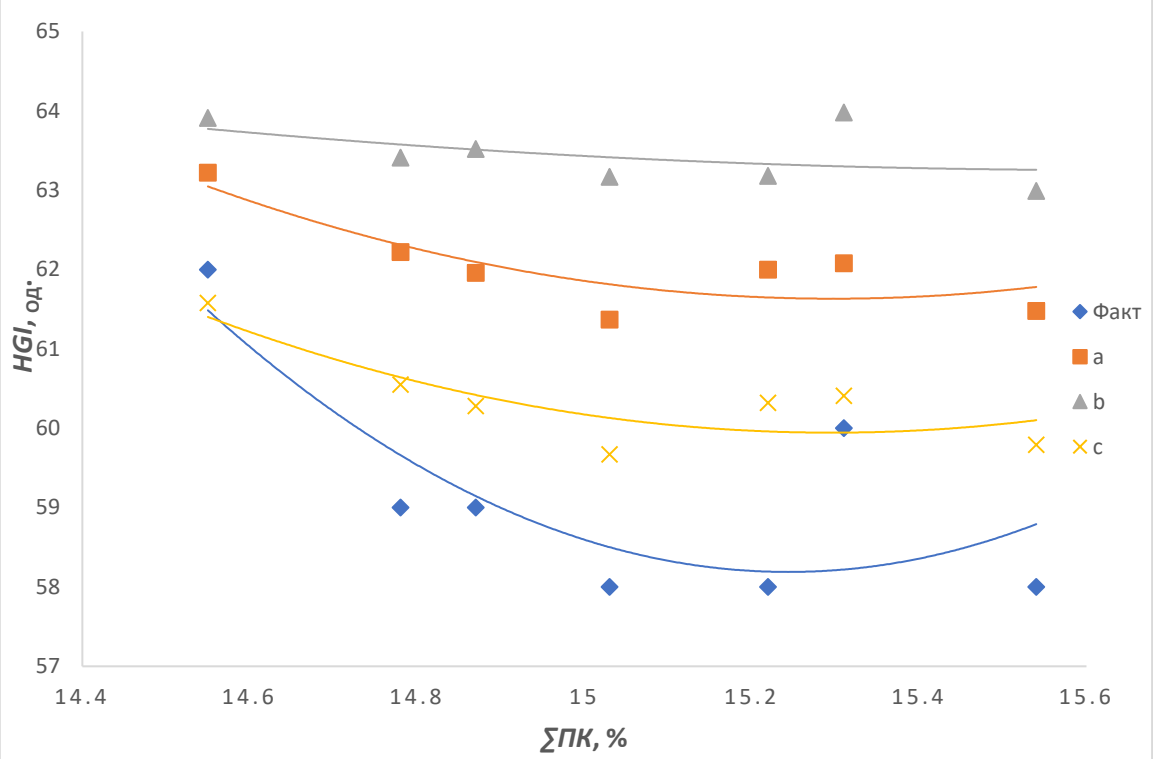
а) – розрахованого за адитивністю; б) розрахованого за формулою залежності *HGI* від V^{daf}; с) розрахованого за формулою для суміші при сумісній підготовці проб від R_0 шихти

Рис. – 5.2. Графік залежності *HGI* (фактичного)



а) – розрахованого за адитивністю; б) розрахованого за формулою залежності *HGI* від V^{daf}; с) розрахованого за формулою для суміші при сумісній підготовці проб від вмісту *Vt* в шихті

Рис. 5.3. – Графік залежності *HGI* (фактичного)



а) – розрахованого за адитивністю; б) розрахованого за формулою залежності *HGI* від V^{daf}; с) розрахованого за формулою для суміші при сумісній підготовці проб від вмісту ∑*ПК* шихти

Рис. 5.4. – Графік залежності *HGI* (фактичного)

Як можна побачити, всі криві мають однакову направленість.

Даючи статистичну оцінку представлених залежностей, можна констатувати, що найнижчими значеннями характеризуються коефіцієнти множинної кореляції та детермінації при розрахунку $HGI_{факт.}$ за вмістом вітриніту. В цьому випадку коефіцієнт множинної кореляції r дорівнює 0,36-0,44; а коефіцієнт детермінації *D* – 13,2-19,2. Також незадовільним рівнем взаємозалежностей характеризуються коефіцієнти *r* і *D* при розрахунку *HGI* від V^{daf}, відповідно (0,48-0,69) і (23,1-47,4). Тож розрахунок коефіцієнту розмолоздатності *HGI* вугільної шихти за вмістом вітриніту або ж за формулою від V^{daf} вважаємо недоцільним.

В усіх інших випадках отримані взаємозв'язки характеризуються високими значеннями коефіцієнтів кореляції (0,79-0,99) та детермінації (62,6-97,2).

Окрім визначення фактичного коефіцієнту *HGI* представлених шихт, їх $HGI_{розр.}$ також було розраховано кількома методами:

1. За методом адитивності.

2. За відомою [67] формулою залежності *HGI* від V^{daf}:

$$HGI = -0{,}0238 \cdot (V^{daf})^2) - 0{,}361 \cdot V^{daf} + 99{,}321, \qquad (5.1)$$

де V^{daf} – вміст летких речовин у шихті.

3. За визначеною нами попередніми дослідженнями [68] формулою *HGI* для суміші при сумісній підготовці проб:

$$HGI_{факт,2} = 1{,}0313 \cdot HGI_{розр.} - 3{,}6162, \qquad (5.2)$$

де $HGI_{розр.}$ – значення коефіцієнту розмолоздатності шихти, розрахованого за методом адитивності її компонентів.

У таблиці 5.8 представлені результати визначень коефіцієнту розмолоздатності *HGI* представлених шихт – фактичні та розрахункові, отримані методом адитивності та за залежностями *(5.1)* і *(5.2)*.

Аналізуючи дані, наведені у табл. 5.8 можна констатувати, що розбіжності між фактичними та розрахунковими значеннями коефіцієнту розмолоздатності є найбільшими при розрахунку за залежністю *(5.1) f (HGI)* від V^{daf} – (2-5 од.), а при розрахунку за залежністю *(5.2)* – є найменшими (0-2 од.). Також варто відзначити той факт, що зі зростанням експериментально отриманих коефіцієнтів розмолоздатності від 58 до 60-62 од., їх відхилення від розрахункових значень зменшується у всіх випадках, а у випадку

розрахунку за залежністю *(5.2)* дорівнює нулю. На нашу думку, це пов'язано з тим, що зі зростанням вмісту в шихтах газового вугілля (до 31 %) при підготовці проби переважно саме воно потрапляє до розмелювальної чаші і таким чином впливає на зміщення коефіцієнта *HGI* шихти до значення *HGI* твердішого вугілля.

Таблиця 5.8

Співставлення фактичних і розрахункових значень HGI

Шихта	Коефіцієнт розмолоздатності по Хардгрову						
	Експериментально отриманий	Розрахований за адитивністю	$\lvert HGI_{,факт} - HGI_{,розр.}\rvert$	Розрахований від за рівн. *(5.1)* від V^{daf}	$\lvert HGI_{,факт} - HGI_{,розр.}\rvert$	Розрахований від за рівн. *(5.2)* для суміші	$\lvert HGI_{,факт} - HGI_{,розр.}\rvert$
ПРАТ «ЮЖКОКС»	58	61	3	63	5	60	2
ПРАТ «ДКХЗ»	58	62	4	63	5	60	2
ПРАТ «АКХЗ» КЦ-1	59	62	3	64	5	60	1
ПРАТ «АКХЗ» КЦ-2	58	61	3	63	5	60	2
ПРАТ «АКХЗ» КЦ-4	59	62	3	63	4	61	2
ПРАТ МК «Азовсталь» («КХП АС»)	62	63	1	64	2	62	0
ПРАТ «ЗАПОРІЖКОКС»	60	62	2	64	4	60	0
Максимальне	62	63	4	64	5	62	2
Мінімальне	58	61	1	63	2	60	0
Середнє	59,1	61,9	2,7	63,4	4,3	60,4	1,3

Крива фактичних значень *HGI* також на всіх графіках (5.1-5.4) розташовується найнижче, найближче до неї розташовується крива *HGI* (c), розрахованих за формулою *(5.2)* для суміші при сумісній підготовці проб, ще вище – крива (a) значень *HGI*, розрахованих за адитивністю і найвище – *HGI*, розрахованих за формулою (5.1) залежності *HGI* від V^{daf} (b). Це наочно показує, що найточніші значення коефіцієнтів розмолоздатності отримаємо, розраховуючи їх з формули *(5.2)*, але фактичні значення в будь якому разі є дещо нижчими.

5.2 Вплив сформульованих принципів визначення розмолоздатності за методом Хардгрова на оптимізацію роботи подрібнюючого відділення вуглепідготовчих цехів коксохімічних підприємств України

У зв'язку з погіршенням сировинної бази та збільшенням частки газового вугілля в шихті якість коксу та сталість його властивостей в основному залежать, за інших рівних умов, від обладнання та технологічних схем вуглепідготовчих цехів.

Основними показниками якості вугільної шихти є дані її технічного аналізу, рівень подрібнення та щільність насипної маси. Рівномірність якісних характеристик вугільної шихти є умовою, що визначає рівномірність якості коксу, і, стійку роботу доменних печей та інших споживачів коксохімічної продукції [69, 70]. При підготовці вугілля до коксування необхідно досягати оптимального співвідношення класів крупності в шихті для забезпечення вищої щільності завантаження; уникати утворення великої кількості тонких класів, що знижують спікливу здатність вугілля. Великі класи шихти за спікливістю, зольністю і петрографічного складу не мають різко відрізнятися від інших класів. При одній і тій же мірі подрібнення, що характеризується вмістом класів < 3 мм, різні способи підготовки шихти можуть давати в кінцевому продукті різний вміст пилу (клас крупності < 0,5 мм). Збільшення ступеня дроблення вугілля призводить до підвищення

в’язкості пластичної маси. Однак не можна пов’язувати цей ефект лише зі збільшенням питомої поверхні вугільних частинок, що контактують. Таким чином, зміни характеру процесів, пов'язаних з деструкцією речовин вугілля, в результаті зміни швидкості нагрівання та ступеня дроблення вугілля визначають фізико-механічні властивості коксу [71].

При використанні будь-якої із схем дроблення, компоненти, що слабо спікаються (дюрен), повинні мати більший ступінь подрібнення, а добре спікливі – менший.

Положення оптимуму подрібнення змінюється залежно від глибини збагачення вугілля, його петрографічного складу та спікання. Чим більше вугілля мінералізоване і петрографічно неоднорідне, тим вище має бути ступінь подрібнення вугілля для отримання міцнішого коксу.

Зазвичай у вуглепідготовчих цехах коксохімічних підприємств України в якості основних агрегатів для дроблення вугілля використовуються дробарки молоткового типу. Пристрій та робота молоткової дробарки досить прості. В основу роботи дробарки покладено принцип подрібнення ударом та стиранням [72].

У роботі [24] наведено дані щодо співвідношення необхідної потужності для дроблення вугілля або його сумішей, що характеризуються різним значенням показника *HGI* (рис. 5.5).

З представлених на рис. 5.5 даних, можна констатувати, що збільшення показника *HGI* призводить до істотного зниження витрат на подрібнення як індивідуального вугілля так і його сумішей.

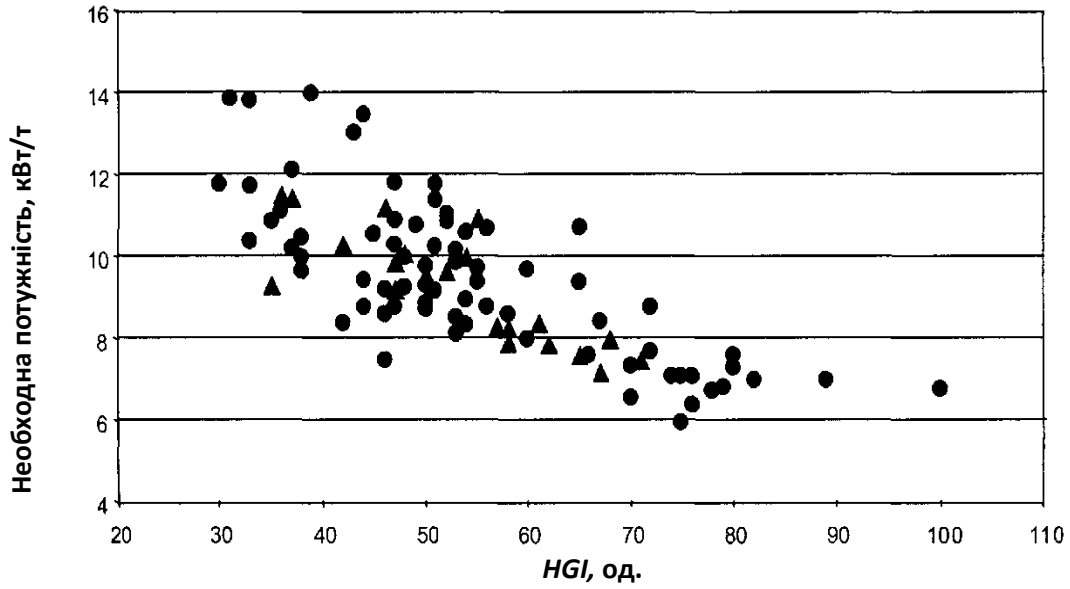


Рис. 5.5 – Потужність дробарки, необхідна для дроблення вугілля та його сумішей, що характеризуються різними показниками *HGI*.

В роботі [23] розраховано, що за всіх інших рівних умов максимальна потужність дробарки збільшується або зменшується в залежності від коефіцієнта розмолоздатності вугілля за наступною залежністю:

$$\frac{B_{max,1}}{B_{max,2}} = \frac{0{,}0034 \cdot HGI_1^{1,25} + 0{,}61}{0{,}0034 \cdot HGI_2^{1,25} + 0{,}61} \tag{5.3}$$

де B_{max} – максимальна потужність дробарки, кг/с;

HGI – коефіцієнт розмолоздатності по Хардгрову, од.

Залежність (5.3) дає змогу розраховувати зміну потужності дробильного обладнання при зміні розмолоздатності вугілля, що використовується. Таким чином, було розраховано зміну потужності дробарки при зміні розмолоздатності всіх досліджених шихт (табл. 5.9). Також в таблиці вказано різницю між потужністю дробарки при її налаштуванні за фактичними даними коефіцієнтів розмолоздатності шихти – $HGI_{факт}$ та розрахунковими – $HGI_{розр.}$

Таблиця 5.9

Зміна потужності дробарки при зміні розмолоздатності шихти, що використовується.

Шихта	Зміна потужності дробарки, %					
	Зростання B_{max} при розрахунку *HGI* за адитивністю	$\lvert B_{max\ факт} - B_{max\ розр.}\rvert$	Зростання B_{max} при розрахунку *HGI* за рівн. *(5.1)* від V^{daf}	$\lvert B_{max\ факт} - B_{max\ розр.}\rvert$	Зростання B_{max} при розрахунку *HGI* за рівн. *(5.2)* для суміші	$\lvert B_{max\ факт} - B_{max\ розр.}\rvert$
ПРАТ «ЮЖКОКС»	103,1	3,1	105,1	5,1	102,0	2,0
ПРАТ «ДКХЗ»	104,1	4,1	105,1	5,1	102,0	2,0
ПРАТ «АКХЗ» КЦ-1	103,0	3,0	105,1	5,1	101,0	1,0
ПРАТ «АКХЗ» КЦ-2	103,1	3,1	105,1	5,1	102,0	2,0
ПРАТ «АКХЗ» КЦ-4	103,0	3,0	104,1	4,1	102,0	2,0
ПРАТ МК «Азовсталь» («КХП АС»)	101,0	1,0	102,0	2,0	100,0	0,0
ПРАТ «ЗАПОРІЖКОКС»	102,0	2,0	104,1	4,1	100,0	0,0
Максимальне	104,1	4,1	105,1	5,1	102,0	2,0
Мінімальне	101,0	1,0	102,0	2,0	100,0	0,0
Середнє	102,8	2,8	104,4	4,4	101,3	1,3

Таким чином, аналізуючи дані, наведені у табл. 5.9 можна побачити, що максимальне відхилення потужності (від 2,0 до 5,1 %) спостерігається при дробленні шихти при налаштуванні подрібнюючого обладнання за даними коефіцієнтів розмолоздатності шихти за формулою *(5.1)* від V^{daf} шихти. Дещо менші відхилення потужності (від 1,0 до 4,1 %) спостерігаються при дробленні шихти при налаштуванні подрібнюючого обладнання за даними коефіцієнтів розмолоздатності шихти, розрахованих за адитивністю. І найменші відхилення (від 0 до 2,0 %) спостерігаються при дробленні шихти при налаштуванні подрібнюючого обладнання за даними коефіцієнтів розмолоздатності шихти за отриманою нами формулою *(5.2)* для суміші компонентів.

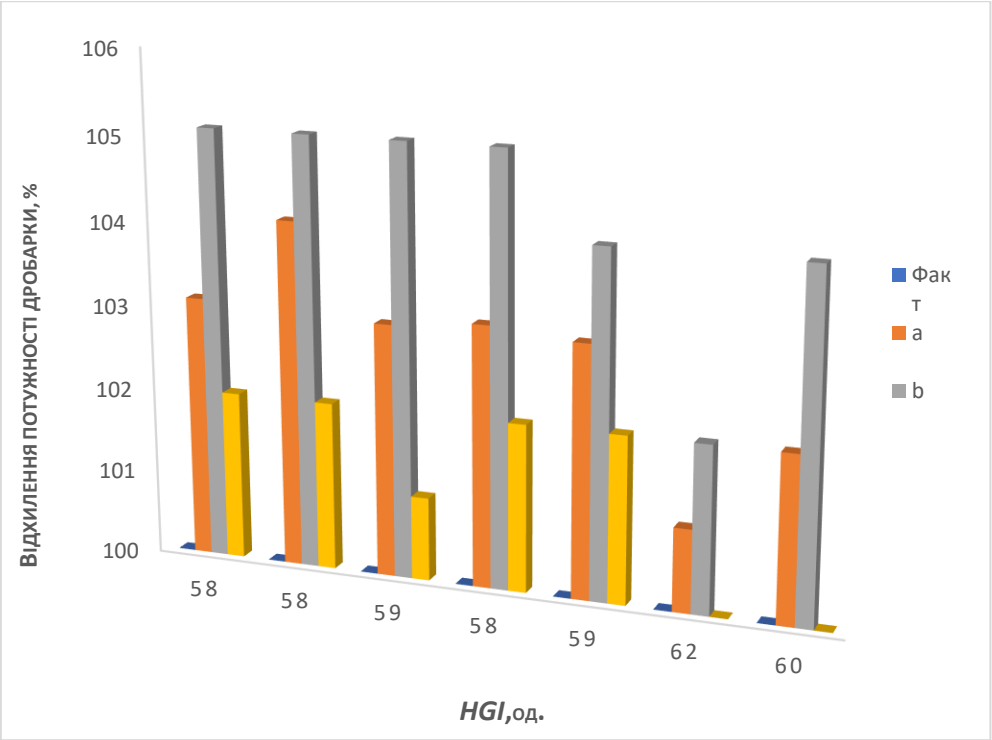
Наочно отримані дані проілюстровано на діаграмі відхилень потужності дробарки при налаштуванні її за даними *HGI* шихти розрахованими в різний спосіб від її налаштування за фактичними даними *HGI* (рис. 5.6).

З метою дослідити вплив запропонованого методу визначення коефіцієнта розмолоздатності по Хардгрову на вміст пилоподібних класів у підготовленій шихті, проводили дослідження в умовах ВПЦ-2 ПрАТ «АКХЗ». В рамках експерименту дробарки ДМРЕ подрібнюючого відділеня ВПЦ-2 налаштовувались згідно технічного завдання на помел промислової шихти 80 ±1% в різний спосіб:

а) *HGI* шихти розрахований за адитивністю;

б) *HGI* шихти розрахований за формулою залежності *HGI* від V^{daf};

с) *HGI* шихти розрахований за формулою для суміші при сумісній підготовці проб.



а) – розрахованого за адитивністю;

б) розрахованого за формулою залежності *HGI* від V^{daf};

с) розрахованого за формулою для суміші при сумісній підготовці проб

Рис. 5.6. – Діаграма відхилень потужності дробарки при налаштуванні її за даними *HGI* шихти розрахованими в різний спосіб від її налаштування за фактичними даними *HGI*:

У табл. 5.10 наведені результати визначення гранулометричного складу, середнього діаметру і насипної щільності дроблених вугільних шихт.

Як видно з наведених даних, застосування налаштування дробарки за запропонованим методом призводить до мінімізації вмісту пилоподібних класів (<0,5 мм) з 30,2 до 28,4 (на 1,8 %) порівняно з налаштуванням розмолоздатності шихти розрахованої за адитивністю та з 30,4 до 28,4 (на

2,0 %) порівняно з налаштуванням розмолоздатності шихти розрахованої за формулою залежності *HGI* від V^{daf}.

Таблиця 5.10

Гранулометричний склад та насипна щільність вугільних шихт після дроблення

Варіант	Гранулометричний склад (мм), %							Середній діаметр частинок, мм	Насипна щільність, кг/м^3
	>13	6–13	3–6	1–3	0,5–1	<0,5	<3	d_s	BD^r
а	0	1,1	19,0	21,4	28,3	30,2	79,9	1,68	669
б	0	0,5	18,9	21,6	28,6	30,4	80,6	1,62	663
с	0	1,4	18,8	31,1	20,3	28,4	79,8	1,82	688

Регламентований помел шихти 80±1% у всіх трьох варіантиах дотримано. Слід відзначити також, що зниження вмісту пилоподібних класів у шихті своєю чергою закономірно призводить до зростання величини її насипної щільності.

Таким чином, оптимізація роботи подрібнюючих відділень ВПЦ цехів коксохімічних підприємств України на основі сформульованих принципів визначення розмолоздатності вугільних шихт досягатиметься за рахунок значно точнішого визначення відхилень потужності дробарки при налаштуванні її за даними *HGI* шихти запропонованим методом.

5.3 Розрахунок очікуваної економічної ефективності виконаного дослідження.

У дослідженні на підставі аналізу сучасного стану методології оцінювання показано, що налаштування подрібнюючого обладнання за рахунок наразі існуючих методів розрахунку коефіцієнтів розмолоздатності шихти, відрізняється доволі високими значеннями відхилень потужності дробарки. Так, при розрахунку розмолоздатності шихти за адитивністю її

компонентів середнє відхилення потужності становить 2,8 %, а при розрахунку за формулою залежності *HGI* від V^{daf} – 4,4 % від фактичних значень (табл. 5.9).

Натомість, як альтернативу, запропоновано визначати налаштування потужності дробарки за визначеною формулою прогнозування коефіцієнту розмолоздатності шихти. В цьому випадку середнє відхилення потужності становить 1,3 % від фактичної потужності.

Тобто, оцінювання потужності дробарки за запропонованою формулою відрізняється в середньому в 2,2 рази точнішими значеннями відхилень від значень, визначеними за адитивністю (2,8/1,3); та в 3,4 рази точнішими значеннями відхилень від значень, визначеними за формулою залежності *HGI* від V^{daf} (4,4/1,3).

В умовах ВПЦ ПРАТ «ЗАПОРІЖКОКС» середня питома витрата електроенергії в залежності від розмельних властивостей вугілля становить 3,6 кВт-год./т.

Рішенням Національної комісії [73], яка здійснює державне регулювання у сфері енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП), з 1 січня 2023 року вартість електроенергії для непобутових споживачів складає 380,28 грн/МВт-год.

Таким чином, враховуючи питому витрату та її вартість електроенергії, в таблиці 5.10 представлені дані щодо витрат та вартості електроенергії на дроблення 100 т шихти в залежності від методу визначення коефіцієнтів розмолоздатності шихти.

Таким чином, оцінювання потужності дробарки за запропонованою формулою *(5.2)* дозволяє знизити вартість дроблення 100 т шихти на 2054-4244 грн.

За даними ОП «Укрметалургпром» [74], за 12 місяців 2022 року виробництво металургійного коксу становило 3,35 млн т.

Таблиця 5.10

Витрати та вартість електроенергії на дроблення 100 т шихти в залежності від методу визначення коефіцієнтів розмолоздатності шихти

Показник	Метод визначення *HGI* шихти		
	за адитивністю	за рівн. *(5.1)* від V^{daf}	за рівн. *(5.2)* для суміші
Середнє відхилення потужності дробарки	2,8	4,4	1,3
Питома витрата електроенергії на дроблення 100 т шихти, кВт-год.	370080	375840	364680
Вартість дроблення 100 т шихти, грн.	140734	142924,4	138680,5

Тож з урахуванням річного виробництва сухого коксу валового загальна економія у вартісному виразі становитиме:

3,35×1000×1,33×2054=9151597 грн.

або

3,35×1000×1,33×4244 =18909142 грн. *(5.4)*

в залежності від методу визначення коефіцієнтів розмолоздатності шихти, де 1,33 – коефіцієнт витрати сухої кам'яновугільної шихти на виробництво коксу валового сухого, т/т, що відповідає виходу коксу валового сухого від сухої шихти 75,0 %.

Таким чином, практичне використання отриманих результатів дає можливість внаслідок суттєвого підвищення точності оцінювання потужності дробарки зекономити від 9151597 до 18909142 грн. на рік.

Для виробництва 1 млн. т валового коксу ця економія становитиме від 2,73 до 5,64 млн. грн.

Також проведене дослідження дозволяє отримати економічний ефект за рахунок скорочення часу та скорочення вартості на проведення лабораторних досліджень з оцінювання потужності дробарки на основі сформульованих принципів визначення розмолоздатності вугільних шихт.

ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 5

1. Визначені коефіцієнти розмолоздатності *HGI* вугільних шихт основних коксохімічних підприємств України, до складу яких входило вугілля різного ступеню метаморфізму чотирьох основних марок.

2. Встановлено наявність систематичних відхилень фактичних значень *HGI* вугільних шихт при їх сумісній підготовці від їх розрахункових значень в сторону зменшення коефіцієнта *HGI* (до твердішого вугілля). Встановлено також, що зі зростанням експериментально отриманих коефіцієнтів розмолоздатності, їх відхилення від розрахункових значень зменшуються.

3. Виявлена математична залежність, що дає можливість задовільного прогнозування величини *HGI* вугільної шихти за наявності даних коефіцієнтів розмолоздатності окремих її компонентів. Встановлено, що оптимізація схеми підготовки вугілля до коксування досягається за рахунок того, що дана залежність дає змогу значно точніше прогнозувати коефіцієнт розмолоздатності вугільних шихт, ніж раніше використовувані формули розрахунку залежності *HGI* від V^{daf} та за методом адитивності.

4. Показано недоцільність прогнозування значень коефіцієнтів розмолоздатності *HGI* вугільних шихт за вмістом в них вітриніту через низький рівень коефіцієнтів кореляції та детермінації.

5. Оцінювання потужності дробарки на основі сформульованих принципів визначення розмолоздатності вугільних шихт відрізняється в середньому в 2,2 рази точнішими значеннями відхилень від значень, визначеними за адитивністю та в 3,4 рази точнішими значеннями відхилень від значень, визначеними за формулою залежності *HGI* від V^{daf} .

6. Практичне використання отриманих результатів дає можливість внаслідок суттєвого підвищення точності оцінювання потужності дробарки зекономити від 9151597 до 18909142 грн. на рік. Для виробництва 1 млн т валового коксу ця економія становитиме від 2,73 до 5,64 млн. грн.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. В даній монографії вирішено важливе науково-практичне завдання, яке характеризується науковою новизною і має практичне значення, а саме – розроблено науково-технологічні основи оптимізації схеми підготовки шихти до коксування з погляду розмолоздатності її компонентів.

2. Вперше показано, що міцність вугілля, що визначається за методом Протод'яконова, обумовлюють такі чинники як показник відбиття вітриніту (R_0), вихід летких речовин (V^{daf}), середній діаметр частинок вугілля (d_s), а також вміст кисню (O_d^{daf}) та вуглецю (C^{daf}).

3. Розраховано значення коефіцієнтів розмолоздатності по Хардгрову та коефіцієнтів міцності за Протод'яконовим неокисненого (відновленого) коксівного вугілля окремих марок та груп у рамках ДСТУ 3472:2015 «Вугілля кам'яне. Метод визначення окиснення та ступеня окиснення».

4. Вперше встановлено зв'язок між коефіцієнтом міцності за методом Прото`яконова та коефіцієнтом розмолоздатності вугілля за методом Хардгрова. Встановлено, що значення коефіцієнтів *HGI* та *f* є обернено пропорційними; розроблено математичну та графічну залежності їх прогнозу за наявності значень одного з них. Показано, що показники якості вугілля (R_0, V^{daf}, d_s, O_d^{daf}, C^{daf}) мають значно нижчий вплив на коефіцієнт міцності за Протод`яконовим (*f*) (R^2=0,550-0,716) ніж на коефіцієнт розмолоздатності за Хардгровим (*HGI*) (R^2=0,807-0,937).

5. Показано, що коефіцієнт розмолоздатності Хардгрова та коефіцієнт міцності Протод'яконова задовільно класифікують вугілля за рівнем його опору подрібнюючим зусиллям. Для вугілля газової групи значення *HGI* коливається в межах 38-48 од., *f* – від 1,05 до 1,37 од.; для вугілля жирної групи *HGI* = 60 - 66 од., *f* = 0,55 - 0,86 од.; для вугілля коксівної групи *HGI* =69 - 80 од., *f* = 0,54 - 0,93 од.; для вугілля піснувато спікливої групи *HGI*=84-86 од., *f* =0,65 - 0,75 од.

6. Встановлено наявність систематичних відхилень фактичних значень коефіцієнта розмолоздатності Хардгрова *HGI* вугільних шихт при їх сумісній підготовці від їх розрахункових значень в сторону зменшення коефіцієнта *HGI* (до твердішого вугілля). Встановлено також, що зі зростанням експериментально отриманих коефіцієнтів розмолоздатності, їх відхилення від розрахункових значень зменшуються.

7. Розроблено графічно-математичні залежності, що дозволяють прогнозувати коефіцієнт розмолоздатності вугілля за методом Хардгрова (*HGI*) та коефіцієнт міцності вугілля за методом Протод'яконова (*f*) на основі визначення показників його якості (R_0, V^{daf}, C^{daf}, O^{daf}_d).

8. З метою оптимізації схеми підготовки вугілля до коксування сформульовано принципи прогнозування величини коефіцієнту розмолоздатності вугільної шихти. Виявлена математична залежність, що дозволяє прогнозувати значення коефіцієнта розмолоздатності Хардгрова *HGI* бінарних та багатокомпонентних вугільних шихт за даними коефіцієнтів розмолоздатності окремих її компонентів. Встановлено, що оптимізація схеми підготовки вугілля до коксування досягається за рахунок того, що дана залежність дає змогу значно точніше прогнозувати коефіцієнт розмолоздатності вугільних шихт, ніж раніше використовувані формули розрахунку залежності *HGI* від V^{daf} та за методом адитивності.

9. Оцінювання потужності дробарки на основі сформульованих принципів визначення розмолоздатності вугільних шихт відрізняється в середньому в 2,2 рази точнішими значеннями відхилень від значень, визначеними за адитивністю та в 3,4 рази точнішими значеннями відхилень від значень, визначеними за формулою залежності *HGI* від V^{daf}. Це, своєю чергою, запобігає зростанню вмісту пилоподібних класів < 0,5 мм, який в даному випадку слугує основним критерієм оптимізації.

10. Налаштування дробарки за запропонованим методом розрахунку коефіцієнту розмолоздатності вугільної шихти призводить до зниження на 1,8 % вмісту пилоподібних класів (<0,5 мм) порівняно з визначенням

розмолоздатності шихти розрахованої за адитивністю та на 2,0 % порівняно з налаштуванням розмолоздатності шихти розрахованої за формулою залежності *HGI* від V^{daf}.

11. Результати експериментальних досліджень та основні теоретичні положення, що викладено в монографії, використовуються у виробничій діяльності Державного підприємства «Український державний науково-дослідний вуглехімічний інститут (УХІН)», на Приватних акціонерних товариствах «ЗАПОРІЖКОКС» та «ДКХЗ», а також в навчальному процесі на кафедрі технологій переробки нафти, газу та твердого палива Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Плачков И.В., Дунаевская Н.И., Подгуренко В.С., Шиляев Б.А., Ландау Ю.А., Сигал И.Я., Данилко Г.Д. Энергетика: история, настоящее и будущее. Книга 1. От огня и воды к электричеству. – К.: Энергетика: история, настоящее и будуще. 2012-2013. 589 с. http://energetika.in.ua/ru/books/book-1

2. Самойлик В.Г. Классификация твѐрдых горючих ископаемых и методы их исследований. – Харьков: Водный спектр ДжиЕм-Пи. 2016. 308 с.

3. Самойлик В.Г. Физико-химические свойства горючих ископаемых и методы их исследования. – Донецк: ДонНТУ. 2017. 193 с. УДК: 622.7.016.

4. Sloman H. J., Barnhart A.C. The Relative Grindability of Coal. Transactions of the American society of mechanical engineers. *Fuels and steam power*. 2 Pittsburgh, pa. 1958. Vol. 1. P. 773-779 / [Електронний ресурс] / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://cybra.p.lodz.pl/Content/6300/FSP_56_13.pdf.

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

6. Wells J.J., Wigley F., Foster D.J., Gibb W.H., Williamson J. The relationship between excluded mineral matter and the abrasion index of a coal. *Fuel.* 2004. Vol. 83 (3). P. 359-364 / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://doi.org/10.1016/S0016-2361(03)00262-X.

7. Modarres H. R., Kor M., Abkhoshk E., Alfi A., Hower J.C. Prediction of coal grindability based on petrography, proximate and ultimate analysis using neural networks and particle swarm optimization technique. *Energy Exploration & Exploitation.* 2009. Vol. 27 (3). P. 201-212. DOI:10.1260/014459809789618821.

8. ISO 5074:2015 (en) Hard Coal. Determination of Hardgrove grindability index. URL: https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:5074:ed-3:v1:en

9. ГОСТ 21153.1-75 «Породы горные. Метод определения коэффициента крепости по Протодьяконову» / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://docs.cntd.ru/document/1200023972.

10. Белецкий В.С. Уголь в современном мире и Украине . 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.

11. Саранчук В.И., Ошовский В.В., Власов Г.А. Физико-химические основы переработки горючих ископаемых. – Донецк: Східний Видавничий Дім. 2001. 302 с.

12. Andrew Alden. The Mohs Mineral Hardness Scale. About.com: Geology. 2010. / [Электронный ресурс]. – Режим доступу: http://geology.about.com/od/scales/a/mohsscale.htm

13. Кузниченко В.М., Кубрак С.С. Твёрдость кокса: выбор метода определения . *Углехимический журнал*. 2016. № 1. С. 3-6.

14. Салтыкова С.Н., Назаренко М.Ю. Влияние технологических факторов на микротвердость углей. *Известия Томского политехнического университета.* 2019. № 11. С. 172-178. DOI: 10.18799/24131830/2019/11/2363.

15. Справочник коксохимика. Т. I. Угли для коксования. Обогащение углей. Подготовка углей к коксованию [под общ. ред. Борисова Л.Н., Шаповала Ю.Г.]. – Харьков: Издательский дом «ИНЖЭК». 2010. 536 с.

16. Rattanakawin Ch., Tara W. Characteristics of Mae Moh lignite: Hardgrove grindability index and approximate work index. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*. 2012. Vol. 34 (1). P. 103-107.

17. Tichánek F. Contribution to determination of coal grindability using Hardgrove method. Příspěvek ke stanovení melitelnosti uhlí metodou Hargrove / *GeoScience Engineering*. Vol. LIV (2008). No.1. P. 27-32.

18. Khoshjavan S., Khoshjavan R., Reza B. Evaluation of the effect of coal chemical properties on the Hardgrove Grindability Index (HGI) of coal using artificial neural networks. *Journal of the Southern African Institute of Mining and*

Metallurgy. 2013. Vol. 113 (6). P. 505-510. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2225-62532013000600009.

19. Idris A., Man Z., Bustam A., Rabat N.E., Uddin F., Mannan H.A. Grindability and abrasive behavior of coal blends: analysis and prediction. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 2022. Vol. 42 (4). P. 1143-1169. / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://doi.org/10.1080/19392699.2019.1694009

20. Peisheng L., Youhuiб X., Yu D., Xuexin S. Prediction of Grindability with Multivariable Regression and Neural Network in Chinese coal. *Fuel*. 2005. Vol. 84. (18). P. 2384-2388. DOI:10.1016/j.fuel.2005.04.016

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

22. Ural S., Akyildiz M. Studies of the Relationship between Mineral Matter and Grinding Properties for low-rank coals. *International Journal of Coal Geology*. 2004. Vol. 60 (1). P. 81-84. https://doi.org/10.1016/j.coal.2004.07.001.

23. Radic D.B., Obradivic M.O., Stanojevic M.M., Jovovic A.M., Stojilikovic D.D. A study on the grindability of Serbian coals. *Thermal science*. 2011. Vol. 15. (1). P. 267-274. DOI: 10.2298/TSCI1101267R.

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

25. Bond F.C. Crushing and grinding calculations. Part I. *British Chemical Engineering*. 1961. Vol. 6. P. 378-385.

26. Leonel J.R. Nunes Torrefied Biomass as an Alternative in Coal-Fueled Power Plants: A Case Study on Grindability of Agroforestry Waste Forms. *Clean Technologies.* 2020. Vol. 2 (3). P. 270-289. doi: 10.3390/cleantechnol2030018.

27. Eswaraiah C., Gupta A., Nagarajan R., Rajavel M., Nandakumar K. Minimization of fines generation in size reduction of coals by impact crusher. *Fuel Processing Technology.* 2008. Vol. 89 (7). P. 704-714. doi: 10.1016/j.fuproc.2008.01.001

28. Williams O., Eastwick C., Kingman S., Giddings D., Lormor S., Lester E. Investigation into the applicability of Bond Work Index (BWI) and Hardgrove Grindability Index (HGI) tests for several biomasses compared to Colombian La Loma coal. *Fuel.* 2015. Vol. 158 (15). P. 379-387. doi: 10.1016/j.fuel.2015.05.027.

29. Sengupta A.N. An assessment of Grindability index of coal. *Fuel processing Technology.* 2002. Vol. 76 (1). P. 1-10. DOI: 10.1016/S0378-3820(01)00236-3.

30. ДСТУ 3472:2015 « Вугілля буре, кам’яне та антрацит. Класифікація». – Київ: ДП «Держспожив-стандарт України». 2015. 9 с.

31. ДСТУ ISO 562:2015 (ISO 562:2010, IDT) Вугілля кам’яне та кокс. Визначення виходу летких речовин. URL: https://www.iso.org/standard/55943.html

32 56. ДСТУ ISO 589:2015 (ISO 589:2008, IDT) Вугілля кам’яне. Визначення загальної вологи. URL: https://www.iso.org/standard/45370.html

33 57. ДСТУ 3528–97 (ГОСТ 8606–93) (ISO 334–92) Паливо тверде мінеральне. Визначення вмісту загальної сірки. Метод Ешка. – Київ: ДП «Держспожив-стандарт України». 1998. 9 с.

34. ДСТУ 4096–2002 Вугілля буре, кам’яне. Антрацит. Горючі сланці та вугільні брикети. Методи відбору та підготовки проб до лабораторних випробувань. – Київ: ДП «Держстандарт України». 2009. 12 с.

35. ДСТУ 7611:2014 Вугілля кам’яне. Метод визначення окиснення та ступеня окиснення. – Київ: ДП «УкрНДНЦ».. 2016. 8 с.

36. ДСТУ 7722:2015 Вугілля кам’яне. Метод визначення пластометричних показників. – Київ: ДП «УкрНДНЦ». 2016. 18 с.

37. ДСТУ 8699:2016 (ISO 18283:2006, MOD; 18283:2006/Cor 1:2009, MOD) Вугілля кам’яне, антрацит і кокс. Відбирання проб вручну. – Київ: ДП «УкрНДНЦ». 67 с.

38. ДСТУ 8724:2017 Вугілля кам’яне та шихти на його основі. Метод визначення тиску розпирання, який виникає під час коксування. – Київ: ДП «УкрНДНЦ». 2018. 12 с.

39. ДСТУ ISO 11722:2004 Паливо тверде мінеральне. Вугілля кам’яне. Визначення вологи у пробі для загального аналізу методом висушування в азоті. – Київ: ДП «Держспоживстандарт України». 2005. 6 с.

40. ДСТУ ISO 17246:2010 (ISO 17246:2010, IDT) Вугілля. Технічний аналіз. – Київ: ДП «Держспоживстандарт України». 2014. 4 с.

41. Скляр М.Г., Шмалько В.М. Пат. 1520090 А1 СССР, МПК С10В57/00, G 01 N 32/22. Способ определения спекаемости и спекающей способности углей. Заявитель и патентообладатель Украинский научно-исследовательский углехимический институт. Опубл. 07.11.89. Бюл. № 41.

42. Кривоніс В.В., Солов’йов М.О., Ковальов Є.Т., Шмалько В.М. Пат. 38100 Україна, МПК С10В 57/00. Спосіб визначення спікливості та спікливої здатності вугілля та вугільних шихт. Заявник та власник патенту Відкрите акціонерне товариство «Алчевський коксохімічний завод», Український науково-дослідний вуглехімічний інститут. Опубл. 25.12.2008. Бюл. № 24.

43. Шмалько В.М., Соловьев М.А. Теоретические основы разработки нового способа определения спекаемости и спекающей способности уплотненных углей и шихт. *Кокс и химия.* 2009. № 2. С. 2-8.

44. Карчакова В.В., Соловьев М.А., Шмалько В.М. Применение метода определения спекаемости и спекающей способности углей для

характеристики каменноугольных пеков и углеродистых наполнителей. *УглеХимический журнал.* 2013. №4. С. 69-73.

45. Karchakova V.V., Pochilko A. V., Shmalko V.M. Determining the filler in the Sintersng of Pitch Composites. *Coke and chemistry*. 2014. Vol. 57 (1). P. 24-29.

46. Mangi H. N., Chi R., Tian Y. D., Sindhu L., Lijin, He D., Ashraf U., Fu H., Zixuan L., Zhou W., Anees A. The ungrind and grinded effects on the pore geometry and adsorption mechanism of the coal particles. *Journal of Natural Gas Science and Engineering.* 2022. Vol. 100. P. 1–11. https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104463

47. Tretyakova M. V., Linnik Ju. N. The approach to assessingthe efficiency of organizations of fuel-energy complex. *Safety and Reliability of Power Industry.* 2017. Vol. 10. P. 18–25. https://doi.org/10.24223/1999-5555-2017-10-1-18-25

48. Miroshnichenko D.V. Crushing properties of coal. *Coke and Chemistry.* 2013. Vol. 56 (4). P. 449-455. https://doi.org/10.3103/S1068364X13120090

49. Мирошниченко Д. В., Кафтан Ю.С., Десна Н.А., Назаров В.Н., Николайчук Ю.В. Температура возгорания углей. Сообщение 1. Связь с показателями состава, строения и свойств. *Кокс и химия.* 2016. № 8. С. 2–8.

45. Мирошниченко Д. В., Шульга И.В., Кафтан Ю.С., Десна Н.А., Николайчук Ю.В. Температура возгорания углей. Сообщение 2. Бинарные угольные смеси. *Кокс и химия.* 2017. № 6. С. 1–7.

46. Мирошниченко Д. В., Шульга И.В., Кафтан Ю.С., Десна Н.А., Николайчук Ю.В. Температура возгорания углей. Сообщение 3. Многокомпонентные смеси. *Кокс и химия.* 2017. № 9. С. 12–17.

47. Мирошниченко Д. В., Крамаренко В.Ю., Шульга И.В., Кафтан Ю.С., Десна Н.А., Николайчук Ю.В. Температура возгорания углей. Сообщение 4. Влияние скорости нагрева и степени окисленности. *Кокс и химия.* 2018. № 6. С. 12–19.

48. Мирошниченко Д. В., Шульга И.В., Кафтан Ю.С., Десна Н.А., Николайчук Ю.В., Котляров Е.И. Температура возгорания углей. Сообщение 5. Практическое использование. *Кокс и химия.* 2018. № 8. С. 2–8.

49. Румшинский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента: справ. пособие. – М.: Наука. 1971. 192 с.

50. Bagherieh A.H., Hower J. C., Bagherieh A.R. Studies of the relationship between petrography and grindability for Kentucky coals using artificial neural network. *International Journal of Coal Geology.* 2008. Vol. 73 (2). P. 130-138. https://doi.org/10.1016/j.coal.2007.04.002

51. Valyas V.I., Ventc V.A., Koynov A.S. et al. Method of preparing coal charge for coking. Pat. RU2445342C1. Publ. 2012-03-20. Electronic resource: https://patents.google.com/patent/RU2445342C1/ru.

52. Lizogub P.V., Zoltuev I.A., Denisenko E.V. et al. Method for preparation of coal charge for producing metallurgical coke. Pat. RU2637697C1. Publ. 2017-12-06. Electronic resource: https://patents.google.com/patent/RU2637697C1/ru

53. Borisenko A.L., Drozdnik I.D., Desna N.A. et al. Production of the high-quality coke from the coal blends with increased content of gas coals using the method of partial briquetting of the coal blend: Report 1. The study of the possibility of using as a binder for briquetting hydrocarbon products of coke production. *Journal of Coal Chemistry*. 2019 (4). P. 11-20. DOI: 10.31081/1681-309X-2019-0-4-11-20

54. Shmalko V., Karchakova V., Zelenskyi O., Cheshko F. Determining the Filler Activity in the Sintering of Pitch Composites. Chapter in Book « Fillers - Synthesis, Characterization and Industrial Application». Published: February 11th 2019. Electronic resource: DOI:10.5772/intechopen.82012

55. Mori Y.H., Ohnishi K. Grindability Index and Grinder Performance. Energy and Environment: Technological Challenges for the Future. – Tokyo: Springer. 2001. 322 p.

56. Larry J. Thomas, Larry P. Thomas. Coal Geology. – West Sussex: John Wiley & sons LTD. 2002. 384 p.

57. Сафонов А. А., Маусымбаева А.Д., Портнов В.С., Парафилов В.И., Коробко С.В. Анализ возможного использования углей месторождения Шубарколь при выплавке технического кремния. *Уголь*. 2019. №2. С. 68–72. DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2019-2-68-72

58. John T. Riley. Routine Coal and Coke Analysis: Collection Interpretation, and Use of Analytical Data. – Portland: ASTM International Stock. 2007. 104 p.

59. James G. Speight. Handbook of Coal Analysis. – New Jersey: John Wiley & sons Inc. 2005. 240 p.

60. Miroshnichenko D.V., Desna N.A., Koval V.V., Fatenko S.V. Hardgrove grindability of coal. Part 1. Correlations with composition, structure, and properties. *Coke and Chemistry*. 2019. Vol. 62 (1). P. 1–4. https://doi.org/10.3103/S1068364X19010058

61. Miroschnichenko D.V., Shulga I.V., Kaftan Y.S., Desna N.A., Nikolaichuk Y.V. Ignition temperature of coal. 2. Binary coal mixtures. *Coke and Chemistry*. 2017. Vol. 60 (6). P. 219–225.

62. Miroshnichenko D.V., Koval V.V., Fatenko S.V., Nikolaichuk Yu.V. Crushing Properties of Coal 2. Binary Coal Blends. *Coke and Chemistry*. 2020. Vol. 63 (11). P. 513–518. https://doi.org/10.3103/S1068364X20110046

63. Miroshnichenko D.V., Koval V. V., Fatenko S. V. Crushing Properties of Coal 3. Method of Determining the Protod'yakonov Strength Coefficient. *Coke and Chemistry*. 2021. Vol. 64 (1). P. 1–7. https://doi.org/10.3103/S1068364X2101004X

64. Коваль В.В., Мірошниченко Д.В., Богоявленська О.В. Механічна міцність вугілля: методи визначення та фактори впливу (огляд). *ВуглеХімічний журнал.* 2021. № 6. С. 4-17. DOI: 10.31081/1681-309X-2021-0-6-4-17

65. Кузніченко В.М., Шульга І.В., Ситник О.В. Тиск розпирання вугілля та шихт в процесі коксування. Монографія. – Харків: Контраст. 2021. 210 с.

66. Скляр М.Г., Тютюнников Ю.Б. Химия твердых горючих ископаемых. Лабораторный практикум. – Киев: Вища школа. 1985. 247 с.

67. Shmeltser E.O., Lyalyuk P.V., Sokolova V.P., Miroshnichenko D.V. Influence of the Crushing of Bituminous Batch on Coke quality. *Coke and Chemistry*. 2017. Vol. 60 (3). P. 470-475. https://doi.org/10.3103/S1068364X17120067

68. Мениович Б.И., Пинчук С.И., Дюканов А.Г. Повышение эффективности процесса слоевого коксования. – Київ: Техніка. 1985. 229 с.

69. Шатоха И.З., Боклан Б.В., Сычёв П.Л. Влияние равномерности качества угольной шихты и режима коксования на равномерность свойств кокса и показатели доменной плавки. *Кокс и химия.* 1977. № 6. С.20-22.

70. Шатоха И.З., Иваницкий В.Г., Шатоха В.И. Технология подготовки угля на стадии усреднения для производства доменного кокса. Днепропетровск: Пороги. 1997. 248 с.

71. Лялюк В.П., Соколова В.П., Ляхова И.А., Кассим Д.А.. Оценка стабильности прочности кокса по показателям M_{25} и M_{10} в зависимости от колеблемости качества угольной шихты. *Вісник Криворізького національного університету*. 2012. № 33. С. 110–113.

72. Бронников Е.Б., Сманко А.Г., Чешинский Л.С. Отечественные и зарубежные конструкции молотковых дробилок. *Комбикормовая промышленность, экспресс-информация*. 1982. Вып. 6.

73. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.nerc.gov.ua/sferi-diyalnosti/elektroenergiya/promislovist/tarifi-na-elektroenergiyu-d

74. The results of the Mining and Metallurgical Complex of Ukraine for 12 months of 2022. https://www.ukrmetprom.org/pidsumki-roboti-gmk-ukraini-za-12-misyaci/

Наукове видання

КОВАЛЬ Валентин Валерійович
МІРОШНИЧЕНКО Денис Вікторович
БОГОЯВЛЕНСЬКА Олена Володимирівна

ОПТИМІЗАЦІЯ СХЕМИ ПІДГОТОВКИ ВУГІЛЛЯ ДО КОКСУВАННЯ

Монографія

В авторській редакції

Підписано до друку 01.12.2023 р.
Папір офсетний. Гарнітура Pt Serif.
Умовн друк. арк. 7,3 Умовн. фарбо-відб. 7,3
Термін придатності необмежений,
зберігати в сухому місці.

Видавництво «Крок»
Свідоцтво ДК No.3538 від 30.07.2009 року
вул. Гайова, 56, м. Тернопіль, Україна, 47722
info@krokbooks.com
KrokBooks.com

Розробник Видавничий центр НТУ «ХПІ»
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5478 від 21.08.2017
61002, Харків, вул. Кирпичова,2