

© М.Р. Глухова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

## ТЕХНОЛОГІЯ ВИЛУЧЕННЯ ПАЛИВНОЇ МАСИ ІЗ ЗОЛОШЛАКОВИХ ВІДХОДІВ В УКРАЇНІ

© М. Hlukhoveria<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

### TECHNOLOGY OF EXTRACTION OF FUEL MASS FROM ASH AND SLAG WASTE IN UKRAINE

**Мета.** Розробка технологічної схеми з переробки золошлакових відходів вугільних теплоелектростанцій.

**Методика.** Золошлакові відходи теплоелектростанцій складаються з основних компонентів – шлак, зола винесення та незгорілі вугільні частинки, складання відповідної схеми для вилучення вугільних частинок дозволяє розробити ефективну схему переробки золошлакових відходів вугільних теплоелектростанцій. Шлак відділяється від золи виносу за допомогою класифікації на грохоті. Далі використовується спосіб вилучення паливної маси із золи винесення – метод флотації, заснований на селективному закріпленні вугільних частинок на поверхні бульбашок повітря в флотаційній камері, з подальшим вилученням вугільних частинок в пінний продукт. Очищена від паливної маси мінеральна частина золи готова для використання в дорожньо-будівельній індустрії.

**Результати.** Розроблена технологічна схема переробки золошлакових відходів вугільних теплоелектростанцій яка дає змогу отримати шлак, вугільний концентрат та мінеральну частину золи.

**Наукова новизна.** Вперше розроблено математичну модель для прогнозування показників збагачення золошлакових відходів вугільних теплоелектростанцій методом флотації. Для прогнозування показників збагачення необхідно скористатися трьома величинами розкриття: початкова зольність вугільної фракції ( $A_n^d$ ), кількість вугільних зерен ( $P_{PЗ}$ ), кількість породних зерен ( $P_{НЗ}$ ), за умови, що сепараційні характеристики збагачувальних апаратів попередньо експериментально визначаються. На підставі розробленої математичної моделі прогнозування показників збагачення золошлакових відходів складено відповідну флотаційну схему для ефективного вилучення паливної маси, що дало змогу розробити технологічну схему з переробки золошлакових відходів вугільних теплоелектростанцій.

**Практична значимість.** Розроблена технологічна схема з переробки золошлакових відходів дозволяє отримати шлак з виходом 3,11% придатний для відсіпки промислових доріг, вугільний концентрат з виходом 25,75% з зольністю 21,80% може бути використаний як вторинне паливо для ТЕС або в якості сировини для вироблення твердих паливних брикетів, а також мінеральну частину золи з виходом 71,14% з зольністю 98,10% яка може знайти своє використання дорожньо-будівельній індустрії.

**Ключові слова:** зола винесення, теплові електростанції, золошлакові відходи, флотація, вугільний концентрат, реагент-збирач, вугільні шлами, технологічні схеми, техногенні родовища.

**Вступ.** На нинішньому етапі розвитку економіки України дедалі більше уваги приділяється питанням раціонального використання природних ресурсів. Проектування збагачувальної фабрики з переробки техногенних родовищ промислових відходів – це комплекс заходів, які завершують переведення корисних копалин із категорії потенційної цінності на реальну – товарну продукцію.

В Україні за весь час роботи теплових вугільних електростанцій накопичилося понад 360 млн т відходів і щорічно їх обсяг збільшується на 6,2 млн т [1]. Крім цього, близько 200 млн т відходів накопичилося при збагачувальних фабриках та коксохімічних заводах. Незважаючи на загальну тенденцію щодо зниження споживання викопного палива, у 2021 році Україна імпортувала 19,5 млн т вугілля, а вже у 2023 році цей показник досяг рекордного низького значення в 670 тис. т, вугілля залишається поки що основним енергетичним ресурсом країни [2]. Тому відходи, що містять горючу масу, потрібно розглядати як стратегічне джерело енергоносія. Вилучення паливної маси з відходів промисловості дозволить частково перекрити імпорт вугілля, знизити навантаження на бюджет країни, покращити раціональність використання природних ресурсів, скоротити площі земель, які займаються відходами, що значною мірою позитивно вплине на екологію навколишнього середовища.

**Основна частина.** Золошлакові відходи в Україні – це відходи виробництва теплової та електричної енергії, що утворюються після спалювання вугілля різних марок у котлах теплоелектростанцій (ТЕС) або теплоелектроцентралей (ТЕЦ). У країнах Європи та світу не існує поняття «золошлакові відходи», там це «побічний продукт», який законодавчо визначений для використання як:

- сировина для будівельних матеріалів;
- паливо для вугільних теплоелектростанцій;
- наповнювач для дорожнього будівництва;
- стабілізатор ґрунту в сільському господарстві;
- сировина для металовиробництва;
- сировина для виробництва алюмінію.

Вугілля, як тверде паливо, складається з кількох компонентів. Леткі компоненти – волога та леткі горючі речовини, тверді компоненти – коксовий залишок. При спалюванні вугілля першими виходять і реагують леткі компоненти. Коксовий залишок, який складається переважно з вуглецю та золи, реагує набагато повільніше і, в більшості випадків, повністю не згорає. Зола, яка уловлюється на теплоелектростанціях, зазвичай має в своєму складі від 5 до 25% горючого компоненту. Таким чином, поруч з вугільними ТЕС утворюються величезні золошлаковідвали. Так, при будівництві доріг золошлаки, які утворюються при спалюванні вугілля на ТЕС, можуть використовуватися для "подушки" дороги, відсівання насипів і стабілізації ґрунту, як відмінний дренажний і морозозахисний шар. Але зольність його має бути вище 95%, чого не досягається за рахунок тільки спалювання в топці котла. З іншого боку, в матеріалі золошлаковідвалів ще до 20% горючої частини, яку можна використати для спалювання в котлах для отримання додаткового тепла. Складнощі, які при цьому виникають – велика зольність призводить до зниження теплоти згорання, відповідно самостійно

горіти таке паливо не буде, хоча ця проблема вирішується різними методами збагачення золи з отриманням вугільного концентрату з низькою зольністю, золи з малим вмістом горючого матеріалу і промпродукту.

Тому основною метою даної роботи є розробка технологічної схеми з переробки техногенної сировини на прикладі золошлакових відходів Чернігівської ТЕЦ яка дозволить отримувати якісний вугільний концентрат, і як побічний продукт – шлак та мінеральну частину золи.

Вміст цінних продуктів в золошлакових відходах в першу чергу залежить від типу вугілля, що спалюється. Другий важливий фактор - це тип встановлених котлів на ТЕС, чим ефективніше спалюються вугілля, тим менше вміст паливної маси в золошлаках. Окремо варто виділити спосіб скидання шлаку і золи у відходи, на ТЕС вони можуть змішуватись або складуватись в окремі сховища. Наприклад, на Чернігівській ТЕЦ – зола та шлак поділяються на самій станції та транспортуються в окремі карти зберігання. На рис. 1. представлені золошлакові відходи Чернігівської ТЕЦ. Якщо зола і шлак знаходяться в одній карті, то при збагаченні золошлаків значно зростають обсяги шлаку, що вилучається з відходів теплоелектростанцій. З цього випливає, що, розглядаючи золошлакові відходи різних ТЕС, потрібно попередньо зробити лабораторні дослідження, для визначення можливості переробки цих відходів. Для прогнозування показників збагачення продуктів переробки, необхідно вивчити речовинний склад золошлаків.



Рис. 1. Золошлакові відходи Чернігівської ТЕЦ

Схему збагачення вибирають виходячи з фракційного складу сировини, що переробляється, що характеризує взаємозв'язок між роздільною ознакою і вмістом цінного компонента. Оскільки вугільні частинки в золошлакових відходах

мають середню крупність 70 мкм, та найефективнішим методом вилучення цих частинок є флотаційний метод збагачення, який характеризується глибиною збагачення практично до 0 мкм. Тому як основний спосіб для переробки золошлакових відходів Чернігівської ТЕЦ прийнято пінну флотацію. Коли в результаті флотації вилучається вугільний концентрат і залишається очищена від горючої маси мінеральна частина золи.

Запропонована методика прогнозування показників збагачення методом флотації [3], дає можливість розрахувати показники розкриття вугільних частинок у золі і далі знаючи сепараційну характеристику збагачувального апарату, в даному випадку ежекторної флотаційної машини, скласти оптимальну технологічну схему флотації для досягнення високої якості вугільного концентрату. Найкращі показники збагачення досягаються при застосуванні чотирьох операцій розділення. Схема флотації представлена рис. 2, в результаті проведених лабораторних досліджень отримано вугільний концентрат золи з виходом 25,69% і зольністю 21,80%, при цьому вихід мінеральної частини золи склав 74,31% і зольністю 98,10%.

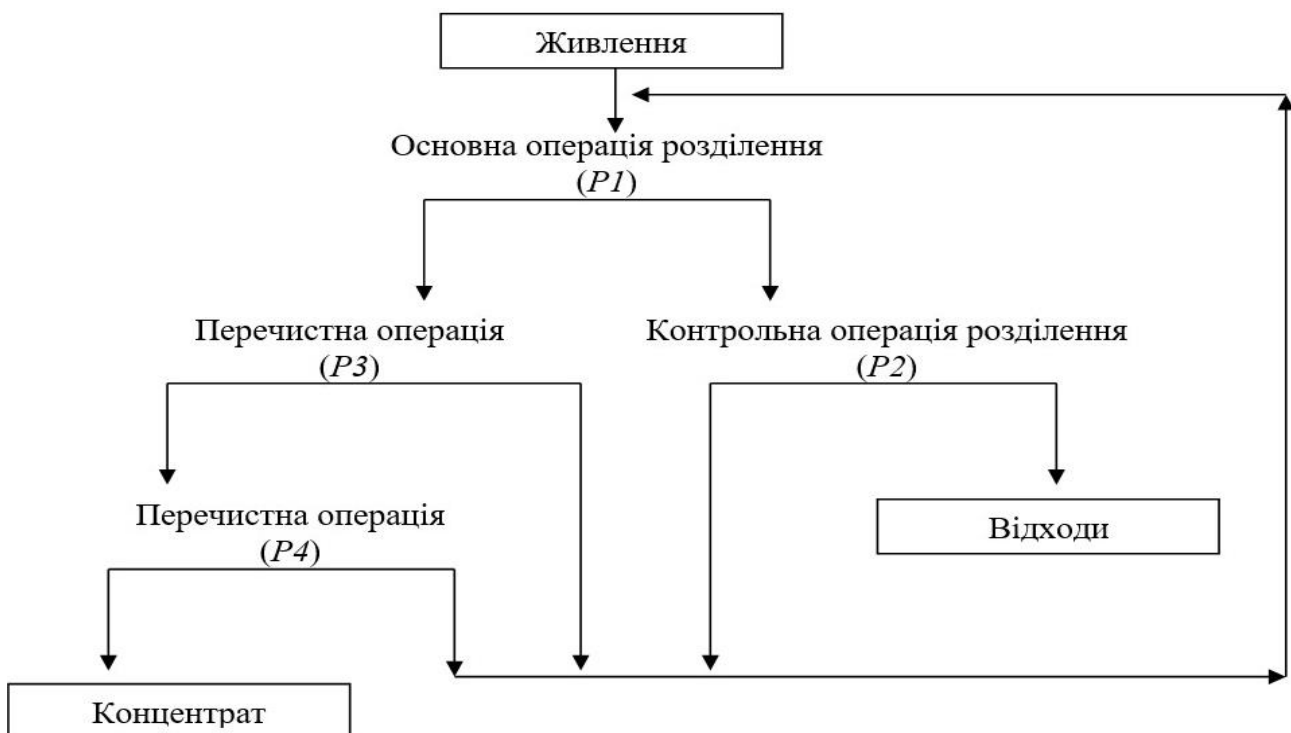


Рис. 2. Технологічна схема з чотирма операціями розділення

Отримані теоретичні та практичні знання з переробки золошлакових відходів вугільних ТЕС [3–5] дозволяють визначити основні вимоги до технології переробки:

- Технологія переробки має бути безвідходною, сумарний вихід всіх продуктів переробки має прагнути до 100%.
- Технологія переробки має бути спрямована на отримання максимального прибутку.

– Методи переробки, що застосовуються, не повинні негативно впливати на навколишнє середовище.

Для досягнення поставленої мети необхідно зробити наступний вплив на відходи ТЕС:

- здійснювати розділення золошлакової суміші за рахунок застосування сепараційних та фізико-хімічних методів;
- змінювати фазові складові золошлаків для отримання продуктів збагачення необхідної якості;
- технологічний процес, що застосовується, повинен визначатися необхідними технічними умовами на вироблену продукцію.

Загалом для комплексної переробки золошлакових відходів слід застосувати три методи розділення: гравітаційний, флотаційний та магнітний.

Метод гравітаційний, застосовується для відокремлення шлаків від золи винесення, межа крупності розділення прийнята – 0,315 мм.

Розроблена флотаційна схема [3] забезпечує отримання вугільного концентрату із зольністю 21,80%. Процес флотації відбувається у присутності флотаційних реагентів – реагент-збирач (гас) та спінювач (масло Т-66), які є ефективними для переробки золошлаків. Отриманий в результаті камерний продукт флотації (мінеральна частина золи) має зольність 98,10%.

Магнітний метод застосовується для вилучення залізовмісного продукту із золошлаків. Магнітний продукт, що отримується, характеризується вмістом  $Fe_2O_3$  не менше 45%.

Переробка золошлакових відходів ТЕС призводить до утворення таких продуктів:

- шлак;
- вугільний концентрат;
- мінеральна частина золи;
- залізовмісний продукт.

Шлаки, що відокремлюються при класифікації на грохоті можуть бути використані для відсипання промислових доріг, ярів, як дешевий замітник щебеню і т.д.

Вугільний концентрат є сумішшю вугільних частинок з мінеральними домішками, зольність даного продукту складає 21,80%. Хімічний аналіз вугільного концентрату дозволяє використовувати його у двох галузях – енергетиці та металургії.

Мінеральна частина золи характеризується наявністю великої кількості  $SiO_2$ , що робить цей продукт перспективним, з точки зору застосування його в дорожньо-будівельній індустрії.

Залізовмісний продукт можна використовувати як обважувач при збагаченні вугілля. Застосовувати даний концентрат для виплавки сталі не є доцільним оскільки має низький вміст  $Fe_{заг}$ . Отримання високоякісного залізовмісного продукту вимагає розробки окремої технологічної схеми з використанням операцій подрібнення та багатостадійної магнітної сепарації. У зв'язку з цим на технологічній схемі рис. 2 показано процес магнітної сепарації, але розрахунки

щодо цього продукту не проводились. Хімічний склад продуктів переробки золошлакових відходів Чернігівської ТЕЦ представлений у таблиці 1.

Таблиця 1

Хімічний склад продуктів переробки золошлакових відходів Чернігівської ТЕЦ

Компонент	Шлак	Вугільний концентрат	Мінеральна частина золи	Залізовмісний продукт
SiO <sub>2</sub>	69,2	13,7	57,96	22,90
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,85	5,23	24,11	10,65
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,67	1,50	4,55	45,57
FeO	1,80	1,07	2,32	11,18
TiO <sub>2</sub>	0,80	0,29	0,84	0,39
CaO	1,23	0,81	3,38	2,95
MgO	1,02	0,53	1,65	3,22
S <sub>заг</sub>	0,01	0,34	0,03	0,04
K <sub>2</sub> O	4,65	1,25	2,31	0,62
Na <sub>2</sub> O	1,05	0,23	0,78	0,41
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,02	0,04	0,40	0,12
MnO	0,03	0,02	0,09	1,02
C	0,67	75,0	1,56	0,93
Сума	100,00	100,00	100,00	100,00

Вугільний концентрат золи має такі характеристики: масова частка вуглецю на робочу масу, не менше ніж 75,00 %; теплота згоряння, МДж/кг, не менше ніж 21,5; зольність продукту 21,80%; масова частка вологи не більше ніж 25,0 %; масова частка сірки не більше ніж 0,34%; вихід летючих не більше 3,4%.

У складі мінеральної частини золи переважають оксиди кремнію – 58,0 % та алюмінію 24,11 %. Мінеральна частина золи характеризується наступними показниками: зольність не менше ніж 98,10%; насипна об'ємна густина 1245 кг/м<sup>3</sup>; справжня густина 2100 кг/м<sup>3</sup>; масова частка вологи не більше ніж 25,00 %; вміст сірки не більше 0,03%.

У складі залізовмісного продукту переважає суміш оксидів заліза (тривалентний та двовалентний), власне магнетит, - 55,0 %, також спостерігається незначна частка суміші алюмосилікатів – 33,0 %. Залізовмісний продукт має насипну густину 1795 кг/м<sup>3</sup>; справжня густина 3500 кг/м<sup>3</sup>; масова частка вологи 25,00%; вміст сірки не більше ніж 0,04 %; залишок на ситі № 0,08 мм – 6,9%.

Шлак може використовуватися як заміник щебеню для відсіпання промислових доріг.

Вугільний концентрат золи може бути використаний:

– як добавка до котельного палива теплоелектростанції з теплотворною здатністю не менше ніж 21,5 МДж/кг;

– для утеплення дзеркала металу при розливанні спокійних марок сталі замість зольно-графітових сумішей. Витрата суміші становить 2,0-3,5 кг/т сталі;

- може знайти застосування як сорбент нафтопродуктів та ПАР;
  - компонент при виготовленні резино-технічних виробів;
  - може застосовуватись для виробництва паливних брикетів для населення.
- Мінеральна частина золи може бути використана як:
- замітник цементу;
  - наповнювач у бетонах;
  - наповнювач при дорожньому будівництві, або виступати як замітник піску;
  - у виробництві сухих будівельних сумішей;
  - наповнювач при виробництві полімерів.

Розроблена технологічна схема з переробки золошлакових відходів Чернігівської ТЕЦ показана на рис. 3. Початковий матеріал 1 надходить на дезінтеграцію (I), де матеріал змішується з водою в співвідношенні Ж:Т=3,23, утворена пульпа з масовим вмістом твердого 23,65% надходить на грохот (II). При грохоченні відбувається класифікація матеріалу по крупності 0,315 мм. Надрешітний продукт 4 крупністю +0,315 мм являє собою шлак, який розвантажується з грохота та складається. Підрешітний продукт 3 крупністю менше -0,315 мм надходить в операцію контактування (III) куди додаються флотаційні реагенти, час контактування становить 4 хв. Підготовлена пульпа надходить в основну флотацію (IV), час флотації становить 3 хв. Отриманий пінний продукт 6 надходить в операцію контактування (V), куди подаються додаткові «голодні» дозування флотореагентів, час контактування становить 3 хв. Далі підготовлена пульпа надходить на флотаційну перечистку I (VI), час флотації становить 2,5 хв. Отриманий пінний продукт 9 надходить на процес контактування (VII), куди додаються «голодні» дозування флотореагентів, час контактування 3 хв. Після чого підготовлена пульпа надходить на флотаційну перечистку II (VIII) час флотації становить 2,5 хв. Пінний продукт 12 який є кінцевим вугільним концентратом необхідної якості, який надходить на фільтрування (IX). В результаті фільтрування одержуємо зневоднений вугільний концентрат 14 з вологістю до 25%, фільтрат 15 направляється в систему оборотного водопостачання. Камерний продукт 7 основної флотації (IV) об'єднується з камерними продуктами I перечисної флотації (VI) і II перечисної флотації (VIII), об'єднаний продукт 16 направляється в операцію контактування (X) куди додаються флотаційні реагенти, час контактування 4 хв. Далі підготовлена пульпа надходить на контрольну флотацію (XI), час флотації 4 хв. Пінний промпродукт, що утворився 17 повертається на основну флотацію (IV). Камерний продукт 18 прямує в операцію фільтрування (XII). Зневоднений продукт 19 (мінеральна частина золи) є кінцевим з необхідною якістю та вологістю до 25%. Фільтрат з прес-фільтра надходить у систему водооборотного водопостачання.

Додатком до схеми може бути застосування магнітної сепарації для вилучення залізовмісного продукту з мінеральної частини золи. В результаті магнітної сепарації можна отримати залізовмісний продукт 21 та немагнітну мінеральну частину золи 22. Якісно-кількісна схема та водно-шламова схема представлена на рис. 4.

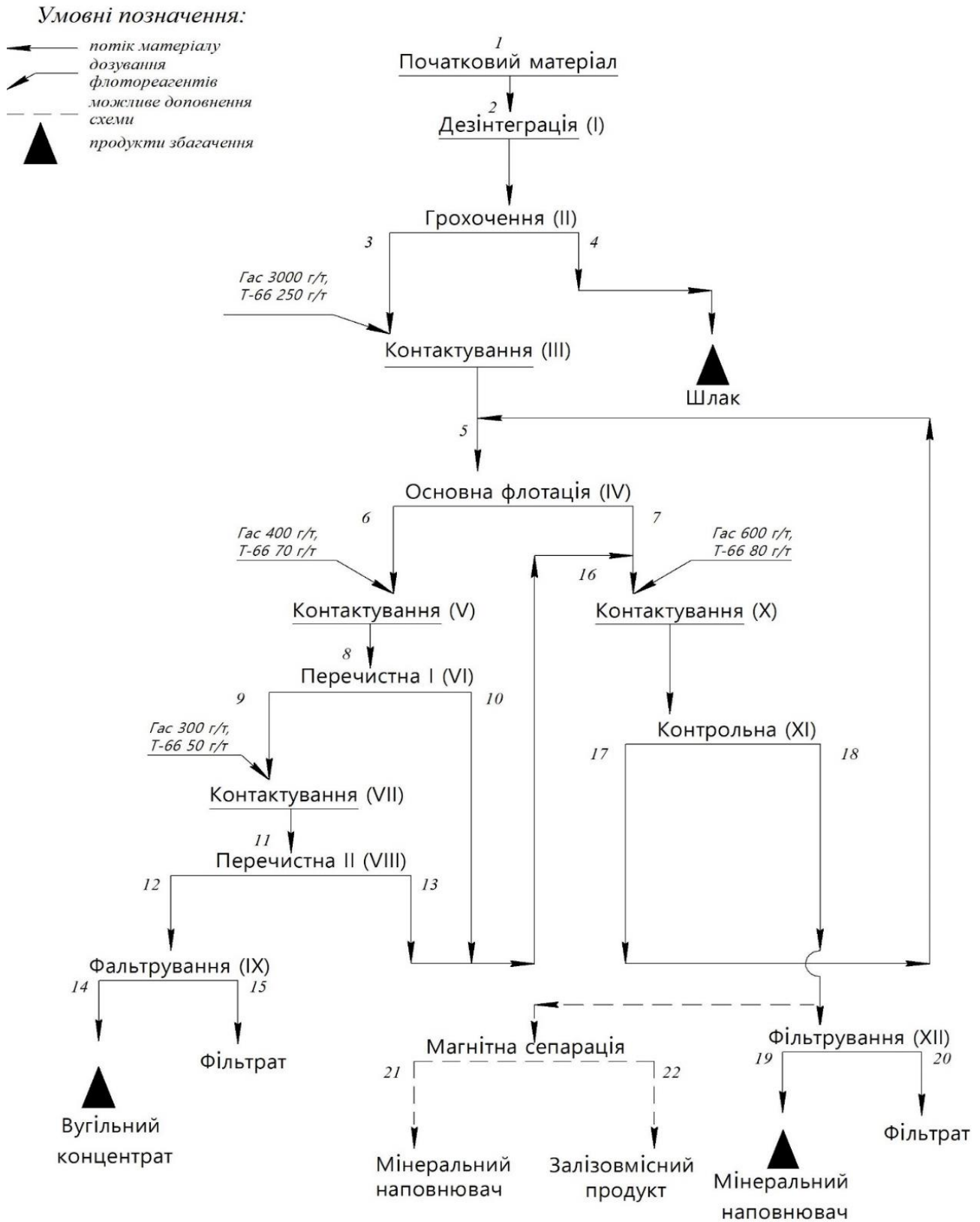


Рис. 3. Технологічна схема переробки ЗШВ ТЕС



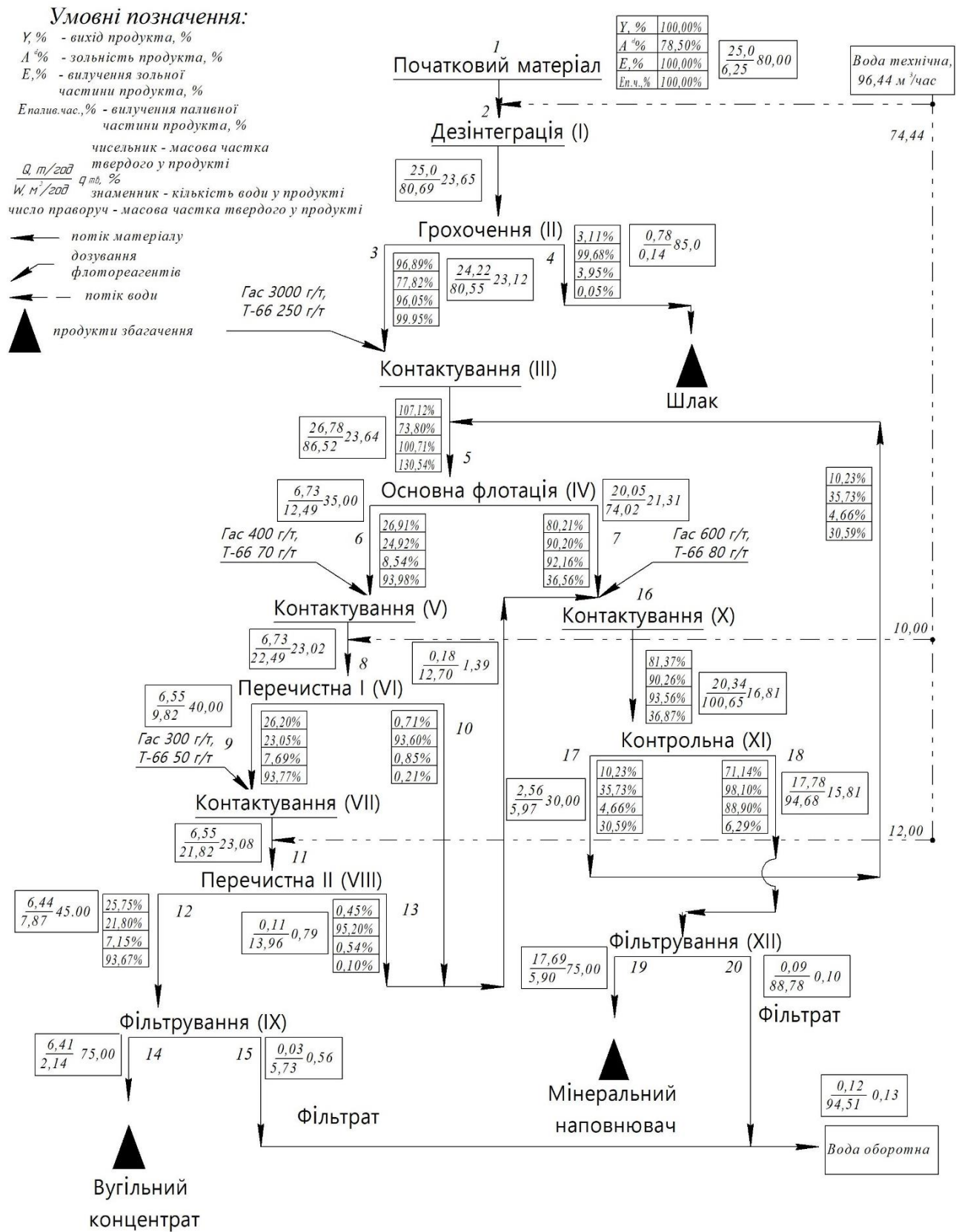


Рис. 4. Якісно-кількісна та водно-шламова схема переробки золошлакових відходів ТЕС

У таблиці 2 представлений баланс продуктів переробки відповідно до операцій флотації, у таблиці 3 наведено загальний баланс продуктів переробки ЗШВ ТЕС.

Таблиця 2  
Баланс продуктів переробки золошлакових відходів за операціями флотації

Основна флотація	Найменування продукту	Показники розділення, %	
		Вихід	Зольність
Основна флотація	Концентрат 1	26,91	24,92
	Відходи 1	80,21	90,20
	Початковий	107,12	73,80
I Перечисна флотація	Концентрат 2	26,20	23,05
	Відходи 2	0,71	93,60
	Початковий	26,91	24,92
II Перечисна флотація	Концентрат 3	25,75	21,80
	Відходи 3	0,45	95,20
	Початковий	26,20	23,05
Контрольна флотація	Промпродукт 1	10,23	35,73
	Відходи 4	71,14	98,10
	Початковий	81,37	90,26

Таблиця 3  
Загальний баланс продуктів переробки золошлакових відходів

Найменування продукту	Показники розділення, %	
	Вихід	Зольність
Шлак	3,11	99,68
Вугільний концентрат золи	25,75	21,80
Мінеральна частина золи	71,14	98,10
Всього	100,00	78,50

**Висновки.** Розроблена технологічна схема переробки золошлакових відходів ТЕС забезпечує 100% переробку. Перевагою застосовуваної технології є використання двох прийомів перечисних флотаційних операцій для вугільного концентрату, тим самим ми підвищуємо якість одержуваного концентрату. Застосування додатково контрольної флотації дає змогу регулювати вміст вугільних включень у камерному продукті (мінеральна частина золи). Повернення промпродукту контрольної флотації в основну флотацію забезпечує вилучення цих частинок в кінцевий вугільний концентрат. В результаті переробки ми отримуємо такі продукти: шлак придатний для облаштування промислових доріг, вихід продукту становить 3,11%; вугільний концентрат золи, який має широкий спектр використання, вихід даного продукту становить 25,75% при зольності 21,80%;

мінеральна частина золи – даний продукт необхідний для дорожньо-будівельної промисловості, його вихід становить 71,14% із зольністю 98,10%.

У зв'язку з цим можна сказати що золошлакові відходи вугільних теплоелектростанцій України можна перенести в категорію стратегічної техногенної сировини.

#### Перелік посилань

1. Григоренко, Ю. (2021, 26 травня). *З двох зол: Україна може наростити утилізацію золошлаків в 11 разів — Статті — GMK Center*. GMK. <https://gmk.center/ua/posts/z-dvoh-zol-ukraina-mozhe-narostiti-utilizaciju-zoloshlakiv-v-11-raziv/>
2. *Експорт кам'яного вугілля й антрацити у 2019-2023 роках*. (2023, 2 вересня). Скільки-скільки? <https://skilky-skilky.info/za-9-misiatsiv-2023-roku-ukraina-eksportovala-576-tys-t-vuhillia/>
3. Hlukhoveria, M., Mladetskyi, I., Levchenko, K., & Berezniak, O. (2022). Beneficiation properties of ash-and-slag dumps. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 1, 46–50. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-1/046>
4. Hlukhoveria, M., Mladetskyi, I., Levchenko, K., & Borysovska, O. (2023). Improving the technology of extracting coal concentrate from fly ash from thermal power plants. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 4, 33–39. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-4/033>
5. Berezniak, O., Dreshpak, O., & Hlukhoveria, M. (2019). Doslidzhennia zbahachennia zolyvynesennia TES na pnevmatychnii flotomashyni typu «Jameson Cell». *Zbahachennia korysnykh kopalyn*, 74, 62–69. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.14163.20009>

#### ABSTRACT

**Purpose.** Development of a technological scheme for the processing of ash and slag waste from coal-fired thermal power plants.

**The methods.** The ash and slag dumps of thermal power plants are made up of the main components - slag, ash and unburned coal particles, drawing up an appropriate scheme for the extraction of coal particles allows the development of an effective scheme for the processing of ash and slag outputs of thermal power plants. The slag is separated from the fly ash by classification on a screen. Next, the method of extracting fuel mass from fly ash is used - the flotation method, based on the selective fixation of coal particles on the surface of air bubbles in the flotation chamber, with subsequent extraction of coal particles into a foam product. The mineral part of the ash cleaned from the fuel mass is ready for use in the road construction industry.

**Findings.** A technological scheme for the processing of ash and slag waste of coal-fired thermal power plants has been developed, which makes it possible to obtain slag, high-quality coal concentrate, and the mineral part of ash.

**The originality.** For the first time, a mathematical model was developed for forecasting indicators of enrichment of ash and slag waste of coal-fired thermal power plants by the flotation method. To predict beneficiation indicators, it is necessary to use three disclosure values: the initial ash content of the coal fraction ( $A_n^d$ ), the number of coal grains ( $P_{P3}$ ), the number of rock grains ( $P_{H3}$ ), provided that the separation characteristics of the beneficiation equipment are experimentally determined in advance. On the basis of the developed mathematical model of forecasting indicators of ash slag waste enrichment, an appropriate flotation scheme for effective extraction of fuel mass was drawn up, which made it possible to develop a technological scheme for processing ash slag waste of coal-fired thermal power plants.

**Practical implementation.** The developed technological scheme for the processing of ash and slag waste makes it possible to obtain slag with a yield of 3.11% suitable for filling industrial roads, coal concentrate with a yield of 25.75% with an ash content of 21.80% can be used as a secondary fuel for thermal power plants or as a raw material for production solid fuel briquettes, as well as the mineral part of ash with a yield of 71.14% with an ash content of 98.10%, which can be used in the road construction industry.

**Keywords:** *ash removal, thermal power plants, ash and slag waste, flotation, coal concentrate, reagent-collector, coal sludge, technological schemes, technogenic deposits.*