

© М.Р. Глуховеря<sup>1</sup>, І.К. Младецький<sup>1</sup><sup>1</sup> Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

## РОЗРАХУНОК КІЛЬКОСТІ РЕАГЕНТУ-ЗБИРАЧА ЩО ПОДАЄТЬСЯ В ПУЛЬПУ ПРИ ФЛОТАЦІЇ

© M. Hlukhoveria<sup>1</sup>, I. Mladetsky<sup>1</sup><sup>1</sup> Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

### CALCULATION OF THE QUANTITY OF REAGENT-COLLECTOR SUPPLIED TO THE PULP DURING FLOTATION

**Мета.** Розробка теоретичних припущень та методики розрахунку достатньої кількості поверхнево-активної речовини (ПАР) реагенту-збирача необхідного для флотаційного збагачення, наприклад, золи винесення теплоелектростанцій (ТЕС).

**Методика.** Будь-який переріз поверхні твердих частинок являє собою в проекції випадкову функцію з виступами та впадинами що чергуються. Зіставлення поверхні частинки з поверхнею овалу чи кулі дає відхилення у більший чи менший бік, тобто утворюються виступи та впадини. Впадини є ініціаторами накопичення зайвої кількості ПАР. Назвемо їх порожнечами. Для вивчення закономірностей зміни поверхні використано статистичний підхід шляхом візуального дослідження під мікроскопом нерівностей поверхні вугільних частинок золи винесення ТЕС для визначення обсягу порожнеч. Для кількісного отримання результатів визначалися відношення вмісту порожнин до об'єму частинки. Розрахунок кількості реагенту-збирача необхідного для заповнення порожнеч поверхні частинок визначався шляхом зіставлення з результатами лабораторних досліджень.

**Результати.** Чим більший розмір частинок, тим більша зміна нерівностей поверхні частинки, тим більший вміст порожнин, які заповнюватиме речовина ПАР і тим менша різниця між поверхнею виступів і поверхнею впадин. Таким чином, кількість ПАР, необхідного для задовільного процесу флотації залежить і від гранулометричного складу сировини. На цій підставі складено методику розрахунку оптимальної (номінальної) витрати ПАР для флотації золи винесення ТЕС. Отримано витрату реагенту-збирача для флотації вугільних частинок золи який склав 2989,6 г/т.

**Наукова новизна.** Отримано аналітичні співвідношення, за допомогою яких можна оцінити вміст порожнеч у частинках корисного компоненту та їх відношення до обсягу частинки і, далі, визначити необхідну кількість ПАР для флотаційного процесу.

**Практична значимість.** Розроблена методика дозволяє розрахувати оптимальну (номінальну) кількість ПАР, яка потрібна для вилучення вугільних частинок методом флотації із золи винесення ТЕС.

**Ключові слова:** зола винесення, теплові електростанції, золошлакові відходи, флотація, вугільний концентрат, реагент-збирач.

**Вступ.** У нинішніх умовах розвитку світової економіки велике значення займає видобуток та переробка корисних копалин. У зв'язку з виснаженням родовищ багатих за вмістом цінного компоненту корисних копалин, дедалі більше уваги приділяється переробці накопичених промислових відходів. В зв'язку з цим розглянемо золу винесення, що утворюється при спалюванні вугільного палива в

топках теплових електростанцій (ТЕС) і яка складається з механічного недопалу та мінеральних домішок. Механічний недопал являє собою незгорілі частинки вугілля у вигляді напівкоксу, гострокутної форми, розміром менше 200 мкм. На деяких ТЕС України вміст частинок пального, що не згоріло, у золи винесення становить від 10 до 25%. Вилучення цих частинок дозволить отримати вторинне паливо, яке може бути придатним для повторного спалювання на ТЕС або знайти інше застосування в промисловості [1].

У ряді робіт [2–6] досліджувалась можливість вилучення вугільного концентрату із золи винесення ТЕС методом флотації. Дослідження підтвердили можливість застосування пінної флотації для отримання вугільного концентрату золи. Отримані вугільні концентрати мали зольність від 34 до 52%. Вихід пінного продукту коливається в межах 5–20 % від загальної маси, цей показник залежить в першу чергу від кількості механічного недопалу, що міститься у золи винесення. Варто звернути увагу на те, що автори вищезгаданих робіт використовують поверхнево активні речовини (ПАР) такі як гас, дизельне паливо, їх ще називають реагенти-збирачі. Дозування збирача вибиралися значною мірою інтуїтивно у необґрунтованих кількостях, які іноді сягають 7 л/т.

Відомо, що у флотаційному процесі малі дозування реагентів спочатку покращують процес вилучення корисних мінералів, потім при перевищенні деякого значення витрати реагентів процес погіршується. Зміна витрати реагентів на кілька десятків грамів після досягнення екстремуму значно впливає на кінцеві показники флотаційного процесу збагачення.

Підібрати оптимальну витрату реагентів-збирачів можна проводячи безліч лабораторних випробувань, але тоді в кожному новому випадку необхідно проводити такі випробування, тому цікавий пошук теоретичних обґрунтувань у цьому напрямку. В зв'язку з цим ґрунтуючись на відомих лабораторних дослідженнях спробуємо розробити теоретичну модель визначення оптимальних витрат реагенту-збирача для золи винесення ТЕС.

**Основна частина.** Реагенти-збирачі являють собою велику групу органічних реагентів: сумішей та індивідуальних речовин, дуже різноманітних та складних за своїм складом та будовою. Вони застосовуються для вибіркової гідрофобізації поверхні мінералів у флотаційній пульпі з метою полегшення прикріплення мінеральних частинок, що флотуються, до повітряних бульбашок для подальшого вилучення їх в концентрати. Таким чином, реагенти-збирачі закріплюються (адсорбуються) на поверхнях мінералів, гідрофобізують їх, тобто сприяють збільшенню спорідненості мінералів до повітря. При взаємодії мінералів з реагентами-збирачами під час флотації спостерігається утворення плівок на поверхні мінеральних частинок. Товщина цієї плівки іноді буває значною, внаслідок нерівномірного дозування, малоефективного контактування пульпи з реагентом та інших причин. Це спричиняє перевитрату реагенту, а також погіршує якісні та кількісні показники флотаційного процесу. Дозування реагентів є одним із найголовніших факторів, що впливають на процес флотації. Поняття дозування малої чи великої кількості реагенту у процес флотації не розглядається, пропонується визначення оптимальної (чи номінальної) кількості реагенту. Тому

завданням цього дослідження є створення методики визначення оптимальної (або номінальної) кількості реагенту, яку необхідно подавати до пульпи при флотації золи винесення ТЕС.

Як відомо [7], найбільш прийнятним методом збагачення вугільних частинок крупністю менше ніж 2,5 мм є пінна флотація. Сам процес флотації відбувається наступним чином, при змішуванні частинок вугілля з водою у присутності відповідного реагенту-збирача на поверхні вугільних частинок створюється шар, що різко зменшує їх змочуваність водою. Присутні в пульпі частинки породи при цьому легко змочуються водою. Інтенсивне перемішування з додатковою аерацією пульпи зумовлює появу піни, внаслідок додавання певної кількості реагенту піноутворювача (іноді збирач є піноутворювачем). Частинки вугілля прилипають до повітряних бульбашок та виносяться вгору, де концентруються в піні. Частинки породи залишаються в масі рідини, оскільки вони позбавлені здатності прилипати до повітряних бульбашок. Таким чином здійснюється поділ вугілля та породи.

Флотаційні процеси поділу припускають взаємодію частинок з реагентами на молекулярному рівні, тому і реагент-збирач також має брати участь на цьому рівні. Мінімальна кількість його має бути такою, щоб покривати поверхню частинок з недоліком, тобто залишати деякі місця вільної поверхні. Залишимо поки що осторонь такі невизначені поняття і припустимо, що реагент-збирач повинен покривати всю поверхню частинок моношаром в один розмір молекули збирача. Найкращі умови впливу реагентів спостерігаються у тому випадку, коли вони розташовуються на частинці моношаром молекул. Така умова спостерігається також при склеюванні тіл: чим тонший шар клею – тим міцніший контакт. І коли товщина шару прагне нуля, тоді міцність склеювання прагне міцності матеріалу тіл. Розглядаючи поверхню вугільної частинки золи (рис. 1) ми виявили, що на поверхні частинки є різноманітні виступи та впадини, і як наслідок реагент який потрапив на таку поверхню заповнюватиме ці нерівності, тому витрата реагенту залежатиме від об'єму цих порожнин, які необхідно заповнити.

Припустимо, частинки паливної маси в золі мають нерівності поверхні з різною частотою проходження виступів і різною амплітудою. Таким чином, функція зміни поверхні частинки є випадковою нестаціонарною функцією, оскільки залежить від розміру частинки: великі частинки мають амплітуди зміни поверхні вищі, а малі частинки – малі. Спостереження показали, що загальної закономірності зміни функції поверхні частки поки що не встановлено. Загалом ми можемо судити про цю функцію за (рис. 1), зробленому під мікроскопом.

Сепарацію золи винесення ТЕС передбачається виконувати з допомогою флотації. Відомо, що цей процес вимагає застосування різноманітних добавок, що сприяють стабілізації пульпи у всіх її станах у флотаційній машині.

Добавки впливають на флотаційний процес екстремально: малі значення спочатку покращують показники сепарації, а потім, за їх надлишку, погіршують. Випробуємо таку теорію.

Добавки отримали назву реагенти-збирачі або поверхнево-активні речовини (ПАР). Вони розподіляються досить тонкою плівкою на поверхні частинок. У

місцях заглиблень поверхні накопичуються в товстіші шари, потім розподіляються по всій поверхні частинки утворюючи суцільний шар реагенту. Це найкраще поєднання ПАР та твердої маси. Потім надлишок ПАР починає ізолювати розділяючі властивості частинок і сепарація погіршується. Спробуємо розкрити ці положення.

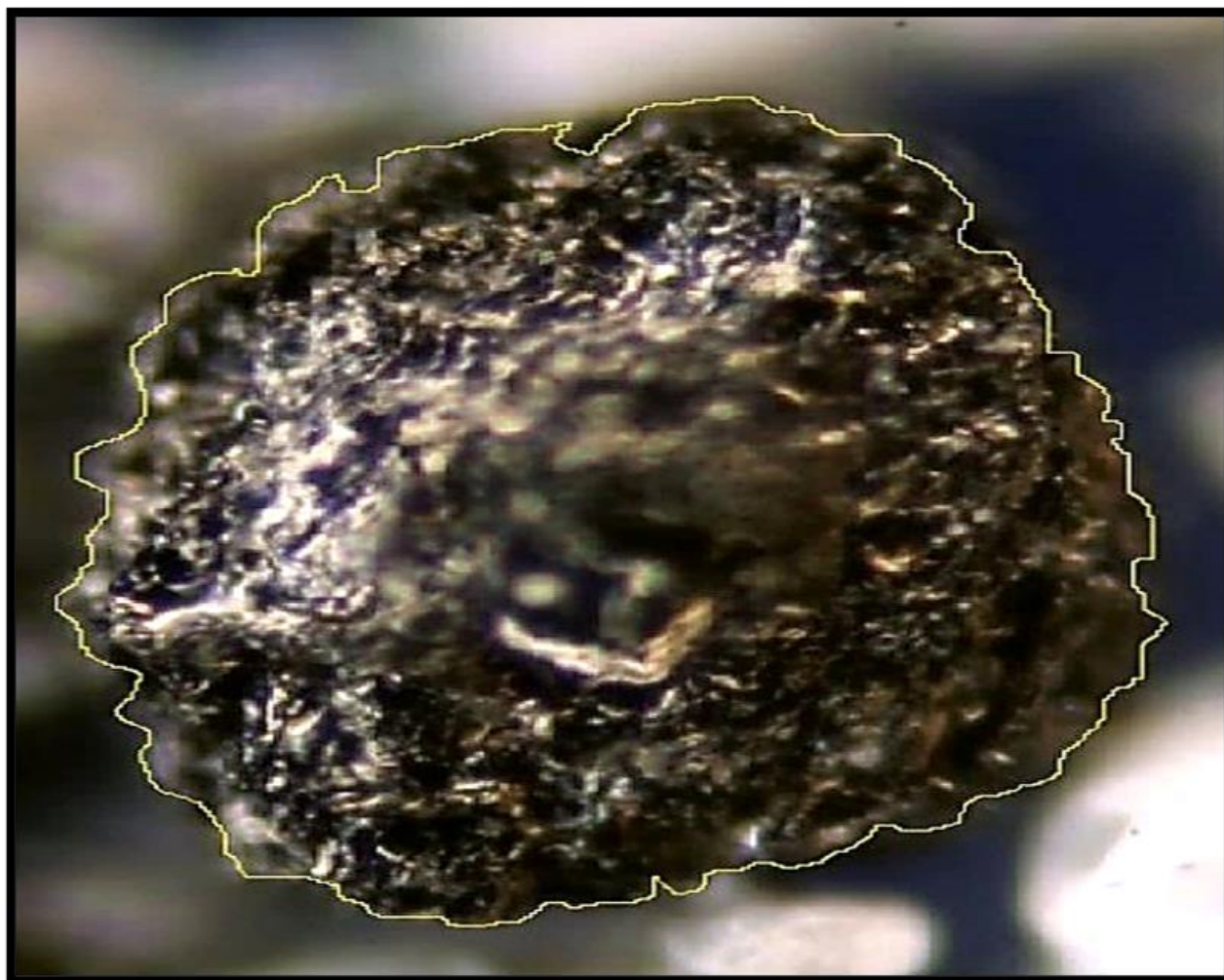


Рис. 1. Зміна поверхні частинки вугілля із золи винесення ТЕС

Частинки твердого продукту після деякого подрібнення мають вільну поверхню неправильної форми, яка у будь-якому поперечному перерізі частки нагадує випадкову функцію. Для визначення закономірностей цієї функції зручно розгорнути поверхню такого перерізу в горизонтальному напрямку області середнього значення (рис. 2). Над лінією середнього значення маємо виступи, а під ним – впадини. Прийmemo найбільший виступ як величину, яка характеризує розмір частинки  $d_v$ , а найменшу впадину, як величину, яка характеризує безперервну тверду фазу  $d_s - \Delta$ .

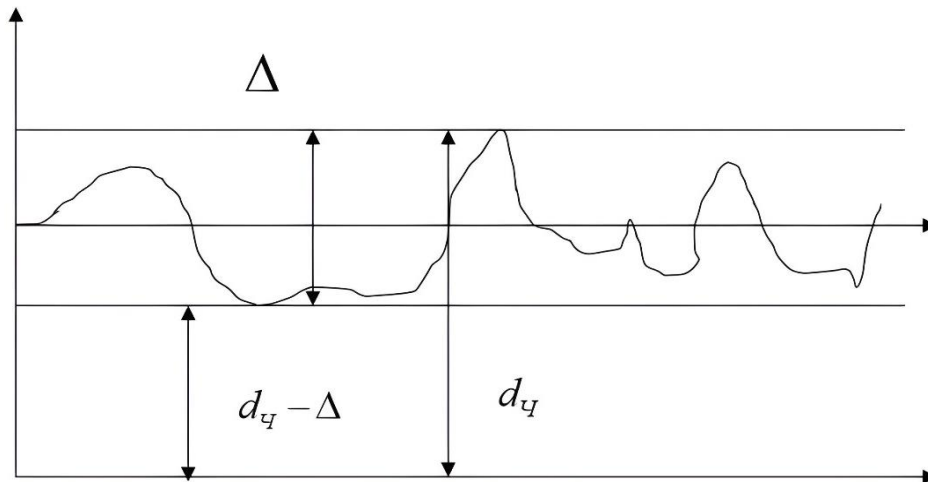


Рис. 2. Крива перерізу поверхні частинки

Об'єм  $V_{\Pi}$ , який включає порожнечі, становить величину:

$$V_{\Pi} = \frac{\pi \cdot d_q^3}{6} - \left( \frac{\pi \cdot (d_q - \Delta)^3}{6} \right) \cdot k,$$

де  $k$  – частина об'єму, заповнена твердою фазою;  $\Delta$  – різниця між виступом та впадиною частинки, м;  $d_q$  – діаметр частинки, м.

Вміст порожнин по відношенню до об'єму частинки буде:

$$f_{\Pi} = \frac{V_{\Pi}}{V_q} = 1 - \left( \frac{d_q - \Delta}{d_q} \right)^3 \cdot k = 1 - \left( 1 - \frac{\Delta}{d_q} \right)^3 \cdot k.$$

Відношення  $\frac{\Delta}{d_q}$  є чимось подібним відношенню середнього квадратичного

відхилення до середнього значення, тобто його можна виразити в  $n$  кількостях  $\Delta$ , що укладаються у розмірі частинки  $d_q$ .

$$n \cdot \Delta = d_q$$

А величину  $k$  також виразимо, як відношення цих же величин:

$$k = \frac{d_q}{d_q - \Delta}$$

Підставивши дані відношення у вираз для  $f_{\Pi}$ , маємо:

$$f_{\Pi} = 1 - \left( 1 - \frac{1}{n} \right)^3 \cdot k = 1 - \left( 1 - \frac{1}{n} \right)^3 \cdot \frac{n}{n-1}$$

Коли  $n \rightarrow 1$ , то  $f_{\Pi} \rightarrow 1$ , що означає вся частинка являє собою об'єм, що включає порожнечі (частки з раковинами).

Коли ж  $n \rightarrow \infty$  (порожнин немає), то  $f_{\Pi} \rightarrow 1$ . Наприклад, частинка нагадує форму ікринки.

Розглянемо чисельно, скільки збирача знадобиться для технологічного потоку. Визначимо вміст порожнин у вугільних частинках золи, розрахунки занеситимемо в таблицю, яка представлена нижче.

Таблиця

Результати розрахунку показників

№	Показник розрахунку	1	2	3	4	5	6	7
1	$d$ , мм	0,01	0,02	0,03	0,05	0,1	0,15	0,2
2	$exp$	0,81	0,66	0,54	0,35	0,12	0,04	0,02
3	$\Delta exp$	0,19	0,15	0,12	0,18	0,23	0,08	0,03
4	$n$	34	42	49	58	66	69	72
5	$\left(1 - \frac{1}{n}\right)^3$	0,914	0,930	0,940	0,949	0,955	0,957	0,959
6	$\left(\frac{n}{n-1}\right)$	1,030	1,024	1,021	1,018	1,015	1,015	1,014
7	$f_{II}$	0,058	0,047	0,040	0,034	0,030	0,029	0,028
8	$f_{II} \Delta exp$	0,011	0,007	0,005	0,006	0,007	0,002	0,001

Сума 8 рядка  $f_{II} \cdot \Delta exp$  (вміст порожнеч) становить 0,039. Об'єм порожнин, який необхідно заповнити реагентом (гасом), визначимо за формулою:

$$V_{II} = W_T \cdot \gamma_{вугл. част.} \cdot \sum f_{II} \Delta exp$$

де  $W_T$  – об'ємна витрата твердого, м<sup>3</sup>/с;  $f_{II} \Delta exp$  – вміст пустот у частинках, част.од.;  $\gamma_{вугл. част.}$  – вміст вугільних частинок у вхідній пробі золи виносу, %.

Визначимо технічні параметри пульпи, яка надходить на флотацію:

- при продуктивності потоку  $Q_{II} = 100 \left[ \frac{m}{год} \right] = 27,78 \left[ \frac{кг}{с} \right]$  та масовому вмісті

твердого  $P_T = 0,3$ , густина твердого  $\delta_T = 2100 \left[ \frac{кг}{м^3} \right]$ , густина води

$$\delta_B = 1000 \left[ \frac{кг}{м^3} \right].$$

Основні співвідношення величин у пульпі становитимуть:

- об'ємна витрата твердого,  $W_T$ :

$$W_T = \frac{Q_{II}}{\delta_T} = \frac{27,78}{2100} = 0,0132 \left[ \frac{м^3}{с} \right]$$

- кількість води,  $Q_B$ :

$$Q_B = Q_{II} \cdot \frac{1 - P_T}{P_T} = 27,78 \cdot \frac{1 - 0,3}{0,3} = 64,82 \left[ \frac{\text{кг}}{\text{с}} \right]$$

- об'ємна витрата води,  $W_B$ :

$$W_B = \frac{Q_B}{\delta_B} = \frac{64,82}{1000} = 0,0648 \left[ \frac{\text{м}^3}{\text{с}} \right]$$

- густина пульпи,  $\delta_{II}$ :

$$\delta_{II} = \frac{Q_{II} + Q_B}{W_T + W_B} = \frac{27,78 + 64,82}{0,0132 + 0,0648} = 1187,17 \left[ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right]$$

- об'ємний вміст твердого,  $P$ :

$$P = \frac{\delta_{II} - \delta_B}{\delta_T - \delta_B} = \frac{1187,11 - 1000}{2100 - 1000} = 0,17$$

- об'ємна витрата пульпи,  $W_{II}$ :

$$W_{II} = \frac{Q_{II}}{\delta_{II}} = \frac{27,78}{1187,11} = 0,023 \left[ \frac{\text{м}^3}{\text{с}} \right]$$

Вміст вугільних частинок у вхідні сировині становить 20%.

Підставимо значення і визначимо обсяг порожнеч:

$$V_{II} = W_T \cdot \gamma_{\text{вугл. част.}} \cdot \Sigma f_{II} \Delta \text{exp} = 0,0132 \cdot 0,039 \cdot \frac{20}{100} = 0,000103 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} = 103,81 \frac{\text{см}^3}{\text{с}}$$

При продуктивності потоку  $27,78 \left[ \frac{\text{кг}}{\text{с}} \right]$  потрібно подавати  $103,81 \text{ см}^3$  газу на

секунду. Густина газу  $\rho_{\text{газу}} = 0,8 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ .

Тоді маса газу складе:

$$m_{\text{газу}} = V_{II} \cdot \rho_{\text{газу}} = 103,81 \cdot 0,8 = 83,05 \text{ г/с}$$

На кожні  $27,78 \left[ \frac{\text{кг}}{\text{с}} \right]$  руди припадає  $83,05 \text{ г}$  газу. Визначимо витрату реагенту-збирача (газу) на 1 тону вхідної сировини, використавши наступне натуральне співвідношення:

$$1000 \text{ кг}_{(\text{вхід. сировина})} - X \text{ г}_{(\text{газу})} = 27,78 \text{ кг}_{(\text{вхід. сировина})} - 83,05 \text{ г}_{(\text{газу})}$$

$$\text{Звідки, } X = \frac{1000 \cdot 83,05}{27,78} = 2989,6 \text{ г/т.}$$

**Висновки.** Велика кількість поверхнево-активної речовини (ПАР) призводить до того, що речовина обволікає частинки не тільки корисного мінералу а й породи настільки, що вони поступово втрачають свої властивості речовини і приймають властивості ПАР, що в результаті призводить до вилучення концентрат частинок породи. Разом з тим ПАР повинні тільки посилювати поверхневі властивості частинок, але не затьмарювати їх розділяючі властивості.

Знаючи нерівномірність поверхні вугільних частинок золи, яка характеризується наявністю виступів та впадин, за допомогою математичних моделей можна визначити витрату флотаційного реагенту-збирача. Згідно з теоретичними розрахунками отримано витрату збирача гасу на рівні 2989,6 г/т, що досить близько до отриманих результатів лабораторних досліджень. Далі необхідно досліджувати вплив в'язкості збирача на його плинність.

З цього випливає, що будь-яку сировину, яку планується збагачувати методом флотації, необхідно оглянути під мікроскопом, детально вивчити поверхню частинок і в результаті чого можна попередньо не проводячи лабораторних випробувань визначити витрату реагенту-збирача, який буде оптимальним під конкретну сировину.

#### Перелік посилань

1. Sklyar, L.V. (2016). Tekhnologiya obogashcheniya zoloshlakov Zelenodolskoi TES s polucheniemalyumosilikatnikh mikrosfer. *Zbahachennia korysnykh kopalyn*, 63(104), 36–46. <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/151410>
2. Мнушкін, І.І., Лудянський, М.Л., & Нетяга, О.Б. (1988). Вплив аполярних реагентів на флотацію зол теплових електростанцій. *Збагачення корисних копалин*, 38, 67–71.
3. Ryabov Yu. V., Delitsin L. M., Vlasov A. S., & Borodina T. I. (2013). Flotatsiya ugleroda iz zoli unosy Kashirskoi GRES. *Obogashchenie rud*, 4.
4. Ryabov Yu., Delitsyn L., & Ezhova N. (2016). Flotation recovery of carbon from fly ash of coal-fired power plants using mix of kerosene with gasoil. *Obogashchenie Rud*, (5). <https://doi.org/10.17580/or.2016.05.09>
5. Zhang, H., Liu, J., Wang, Y., Cao, Y., Ma, Z., & Li, X. (2013). Cyclonic-static micro-bubble flotation column. *Minerals Engineering*, 45, 1–3. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.01.006>
6. Sahbaz, O., Cinar, M., & Kelebek, S. (2016). Analysis of flotation of unburned carbon from bottom ashes. *Acta Montanistica Slovaca*, 21(2), 93–101.
7. Смирнов, В.О., & Білецький, В.С. (2010). *Флотаційні методи збагачення корисних копалин*. Донецьк.

#### ABSTRACT

**Purpose.** Development of theoretical assumptions and methods for calculating a sufficient amount of surface-active substance (SAS) reagent-collector necessary for flotation enrichment, for example, fly ash from thermal power plants (TPP).

**The methods.** Any cross-section of the surface of solid particles is a random function with alternating ridges and depressions in the projection. Comparing the surface of a particle with the surface of an oval or a sphere gives a deviation in a larger or smaller direction, that is, protrusions and depressions are formed. Depressions are the initiators of the accumulation of an excess amount of surface-active substance. Let's call them voids. To study the patterns of changes in the surface, it was used a statistical approach by visual examination under a microscope of surface irregularities of coal particles of



TPP ash removal to determine the volume of voids. To obtain quantitative results, the ratio of the content of cavities to the volume of the particle was determined. The calculation of the amount of reagent-collector necessary to fill the voids of the surface of the particles was determined by comparison with the results of laboratory studies.

**Findings.** The larger the size of the particles, the greater the change in surface roughness of the particle, the greater the content of cavities that will be filled by the surface-active substance and the smaller the difference between the surface of the ridges and the surface of the depressions. Thus, the amount of surface-active substance required for a satisfactory flotation process also depends on the particle size composition of the raw material. On this basis, a methodology for calculating the optimal (nominal) surface-active substance consumption for flotation of TPP ash was developed. The consumption of the collector reagent for the flotation of coal ash particles was obtained, which was 2989.6 g/t.

**The originality.** Analytical ratios were obtained, with the help of which it is possible to estimate the content of voids in the particles of the useful component and their relation to the volume of the particle, and then to determine the required amount of surface-active substance for the flotation process.

**Practical implementation.** The developed technique makes it possible to calculate the optimal (nominal) amount of surface-active substance necessary for extracting coal particles by flotation from TPP ash.

**Keywords:** *fly ash, thermal power plant, ash and slag waste, flotation, coal concentrate, reagent-collector.*